

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Avaliação de Tensões por Ultra-som no Aro de
Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C**

Autor: Domingos José Minicucci
Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes Santos Jr.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

Avaliação de Tensões por Ultra-som no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas - Classe C

Autor: Domingos José Minicucci

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes Santos Jr.

Curso: Engenharia Mecânica – Mestrado
Área de Concentração: Projeto Mecânico

Trabalho Final de Mestrado apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica/Projeto Mecânico.

Campinas, 2003
S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M664a Minicucci, Domingos José
 Avaliação de tensões por ultra-som no aro de rodas
 ferroviárias forjadas novas – classe C / Domingos José
 Minicucci.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

 Orientador: Auteliano Antunes Santos Jr.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Ultra-som. 2. Tensão superficial. 3. Ondas -
 Tensão. 4. Rodas de vagões. 5. Rodas. I. Santos Jr.,
 Auteliano Antunes. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

Trabalho Final de Mestrado

**Avaliação de Tensões por Ultra-som no Aro
de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas - Classe C**

Autor: Domingos José Minicucci

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes Santos Jr.

Prof. Dr. Marco Lúcio Bittencourt

Instituição: UNICAMP – Faculdade de Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Antônio Ludovico Beraldo

Instituição: UNICAMP – Faculdade de Engenharia Agrícola

Prof. Dr.

Instituição

Campinas, setembro de 2003.

Dedicatória

Dedico esta pesquisa a duas pessoas muito especiais em minha vida: meu pai Domingos, que perdi ainda na minha adolescência, mas que sempre me mostrou a importância do saber, e ao meu filho Luciano, que na simplicidade de sua infância, me faz olhar o futuro do qual ele fará parte.

Agradecimentos

Esta pesquisa contou com a colaboração de pessoas e empresas, às quais presto a minha homenagem:

MWL BRASIL Rodas & Eixos Ltda pelo apoio total a esta pesquisa.

Aos funcionários da MWL BRASIL Rodas & Eixos Ltda, que pela sua dedicação possibilitaram a execução desta pesquisa, em especial ao Engenheiro Marcelo Milagres.

Minha família, em especial à minha irmã Eliana, pela ajuda e pelo incentivo.

Ao amigo Paul Kezmarsky, pela ajuda e colaboração na compra de livros e materiais nos Estados Unidos.

Ao meu orientador, pelo direcionamento da pesquisa.

Aos professores e colegas da UNICAMP, pela ajuda nas diversas etapas desta pesquisa.

A melhor forma de conhecer o futuro é
ajudar a construí-lo

Resumo

MINICUCCI, Domingos José, *Avaliação de Tensões por Ultra-Som no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 119p. Trabalho Final de Mestrado Acadêmico.

Este trabalho procurou desenvolver um método para avaliação de tensões residuais por ultra-som em rodas ferroviárias novas Classe C. Utilizou-se de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) como uma metodologia nova a ser aplicada neste tipo de peça. A pesquisa objetivou o uso do método na linha de inspeção final de rodas da MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda. O trabalho desenvolveu uma metodologia para determinar a constante acustoelástica usando chapas extraídas do aro das rodas, que foram tracionadas com diferentes níveis de forças. O valor da constante acustoelástica obtida foi usado para determinar o valor da tensão residual no aro de dez rodas classe C, em oito pontos ao longo das faces interna e externa. Os valores obtidos foram compatíveis com resultados encontrados na literatura, mostrando que o método pode ser usado em rodas novas para avaliação das tensões residuais oriundas do processo de fabricação. Os resultados mostraram que o método proposto pode substituir os ensaios destrutivos usados atualmente bem como abre um grande caminho para pesquisas futuras objetivando o uso do método para avaliar o nível de tensões em rodas ferroviárias usadas, evitando acidentes por quebras de rodas devido ao alto nível de tensão.

Palavras Chave

- Ultra-som, avaliação de tensão por ultra-som, tensão em rodas, técnicas de ultra-som, ondas longitudinais, avaliação de tensão, avaliação de tensão residual.

Abstract

MINICUCCI, Domingos José, *Stress Evaluation by Ultrasonic Waves at the Rim of New Wrought Railroad Wheels – Class C*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 119p. Final Master Research.

This research studied a method for evaluation the residual stress by ultrasonic waves in new railroad wheels class C, using longitudinal critically refracted waves (L_{cr}) as a new methodology to be used in this component. The research had a goal to use the method at the wheel final inspection line of MWL Brasil Rodas & Eixos. The research studied a methodology to find out the acoustoelastic constant using bars witch were extract at the wheel rim, they were stressed in a different stress level. The value of acoustoelastic constant was used to find out the residual stress value at the rim of ten wheels class C, at eight different points through back and front rim face. The results were according to the literature record and the method can be used at new wheels to evaluate the residual stress witch come through the production process. The results prove that the method can substitute the destructive as well as to open a big possibility for future researches, using this method to evaluate stress in used railroad wheels, to avoid accidents involving broken wheels with high stress level.

Key Words

- Ultrasonic, ultrasonic stress measurement, railroad wheel stress, ultrasonic techniques, longitudinal waves, stress evaluation, residual stress measurement.

Índice

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	x
Nomenclatura	xv
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Formato da Apresentação	4
2 Conceitos Básicos e Revisão da Literatura	6
2.1 Teoria Ondulatória	6
a) Propagação das Ondas	7
b) Natureza das Ondas	7
c) Movimento Periódico	8
2.2 Interferência de Ondas	10
2.3 Ressonância	10
2.4 Efeito Piezoelétrico e Efeito Lippmann	10
2.5 Incidência das Ondas Ultra Sônicas em Diferentes Meios de Propagação	13
2.6 Leis da Reflexão	16
a) Lei de Snell	18

b) Ângulos Críticos	18
2.7 Ondas Ultra-Sônicas	20
a) Ondas Longitudinais	20
b) Ondas Transversais	21
c) Ondas Superficiais e Sub-superficiais	22
c.1) Ondas de Rayleigh	22
c.2) Ondas de Love	23
c.3) Ondas de Lamb	24
c.4) Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr})	25
2.8 Transdutores ou Cabeçotes	27
2.9 Geometria do Feixe Sônico	29
2.10 Tensões Residuais	32
2.11 Aplicação das Ondas L_{cr} para Medição de Tensões	37
2.12 Influência da Mudança de Microestrutura na Variação da Velocidade das Ondas Ultra-sônicas e no Efeito Acustoelástico	44
2.13 Birrefringência	44
2.14 Revisão Bibliográfica	46
3 Processo de Fabricação das Rodas Ferroviárias e Simulação das Tensões Atuantes com Elementos Finitos	66
3.1 Características do Produto	66
3.2 Processo de Produção	70
3.2.1 Aciaria	70
3.2.2 Corte a Quente	71
3.2.3 Forjamento	72
3.2.4 Tratamento Térmico	73

3.2.5	Usinagem	74
3.2.6	Inspeção Final	75
3.3	Simulação com Elementos Finitos	76
4	Materiais e Métodos	79
4.1	Método de Abordagem	79
4.2	Determinação da Constante Acustoelástica com Ondas L_{cr}	81
a)	Corpos-de-Prova	81
b)	Bancada de Teste e Dispositivos	83
c)	Método de Ensaio	85
d)	Programa de Aquisição de Dados	88
4.2.1	Exemplo de Determinação da Constante Acustoelástica	90
4.2.2	Determinação da Incerteza Associada ao processo de Medição	92
4.3	Determinação do Tempo de Referência (t_0) para Rodas Ferroviárias	93
4.4	Determinação da Tensão Residual nas Rodas com Ondas L_{cr}	94
a)	Corpos-de-Prova	94
b)	Bancada de Teste	94
c)	Método de Ensaio	95
d)	Programa de Aquisição de Dados	96
4.5	Planejamento Experimental	96
5	Resultados e Discussões	97
5.1	Constante Acustoelástica	97
5.2	Tempo de Referência	99
5.3	Valores das Tensões nas Rodas	102

6 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	111
Referências Bibliográficas	114

Lista de Figuras

1.1 Roda quebrada em serviço por trinca	1
1.2 Acidente ferroviário na Bélgica em 1998	2
2.1 Espectro das frequências sonoras	8
2.2 Características da onda periódica	9
2.3 Cristal de quartzo com os eixos ópticos principais	12
2.4 Ondas incidentes e refletidas em diferentes meios	14
2.5 Ondas refratadas e refletidas nos meios 1 e 2	17
2.6 Primeiro ângulo crítico (θ_2)	19
2.7 Segundo ângulo crítico	19
2.8 Planos de propagação da onda longitudinal	20
2.9 Plano de propagação da onda transversal	21
2.10 Propagação da onda de Rayleigh	23
2.11 Propagação da onda de Love	24
2.12 Propagação da onda de Lamb	25
2.13 Distribuição do campo de pressão das ondas L_{cr}	26
2.14 Ângulo crítico com ondas frontais e longitudinais	27
2.15 Cabeçote de ultra-som do tipo normal	28
2.16 Cabeçotes angulares	28
2.17 Cabeçote tipo SE	29
2.18 Orientação polar do feixe sônico com lóbulos laterais	30
2.19 Campo próximo	31
2.20 Campo remoto	32
2.21 Deformação e tensão residual na laminação	33

2.22	Tensões residuais em cilindro temperado devido à deformação térmica	34
2.23	Sistema de coordenadas de um campo de tensão	41
2.24	Sentido de polarização das ondas para detectar a birrefringência	45
2.25	Variação da velocidade da onda em função da direção da tensão	47
3.1	Partes das roda ferroviária	66
3.2	Posição de medição da dureza	68
3.3	Lingotamento do aço	70
3.4	Lingotes após remoção das lingoteiras	71
3.5	Corte de blocos por oxicorte	71
3.6	Forjamento e laminação das rodas	72
3.7	Resfriamento controlado	73
3.8	Têmpera em rodas ferroviárias	73
3.9	Máquina de dureza digital com detalhe da impressão	75
3.10	Simulação das tensões devido ao processo de fabricação	77
4.1	Detalhe dos corpos-de-prova das rodas	81
4.2	Perfil da roda com a localização da chapa (corpo-de-prova)	82
4.3	Análise de elementos finitos no corpo-de-prova	83
4.4	Dispositivo para tracionar chapas (corpos-de-prova)	84
4.5	Sistema de fixação dos cabeçotes para ondas L_{cr}	85
4.6	Ensaio nas chapas	85
4.7	Gráfico para determinar o valor de L_{11}	88
4.8	Tela do osciloscópio do programa de aquisição L – Stress	89
4.9	Tela de resultados do programa L-Stress	90
4.10	Gráfico da constante acustoelástica para chapa 100141-1	92
4.11	Pedaço de roda para determinar t_0	93
4.12 a	Ensaio das rodas	95
4.12 b	Célula de carga	95
5.1	Variação de L_{11} em torno da média	98
5.2	Tensões no aro interno e externo da roda 100131	103
5.3	Tensões no aro interno e externo da roda 100132	103
5.4	Tensões no aro interno e externo da roda 100133	104

5.5 Tensões no aro interno e externo da roda 100134	104
5.6 Tensões no aro interno e externo da roda 100135	105
5.7 Tensões no aro interno e externo da roda 100136	105
5.8 Tensões no aro interno e externo da roda 100138	106
5.9 Tensões no aro interno e externo da roda 100139	106
5.10 Tensões no aro interno e externo da roda 100141	107
5.11 Tensões no aro interno e externo da roda 100142	107
5.12 Gráfico comparativo das tensões do lado interno das rodas	109

Lista de Tabelas

3.1 Composição química, conforme AAR	67
3.2 Materiais das rodas, segundo a norma UIC	68
3.3 Características físicas das rodas, segundo a norma UIC	69
3.4 Composição química, segundo a norma UIC	69
3.5 Propriedades térmicas e mecânicas	76
4.1 Composição química das rodas usadas na parte experimental	79
4.2 Processo de tratamento térmico	80
4.3 Valores de dureza das rodas em BHN	80
4.4 Constantes	90
4.5 Tempos de percurso da onda na chapa	91
4.6 Diferença dos tempos de percurso em relação ao tempo de referência	91
4.7 Dados para levantamento do gráfico para determinar L_{11}	92
4.8 Planejamento experimental	96
5.1 Valores das constantes acustoelásticas e correlação linear	98
5.2 Valores dos tempos de referência t_0	100
5.3 Valores finais das tensões nas rodas	108

Nomenclatura

Letras Latinas

A – Amplitude da onda (valor máximo da crista da onda no eixo Y)	m
a – Lado maior do cristal piezoelétrico do cabeçote retangular	mm
A_{CH} - Área da secção transversal da chapa	m^2
A_p - Área do pistão	m^2
b – Lado menor do cristal piezoelétrico do cabeçote retangular	mm
D – Diâmetro do cristal piezoelétrico do cabeçote circular	mm
$d\sigma$ - Variação da tensão	MPa
D_C - Distância entre os cabeçotes	mm
E – Módulo de elasticidade	MPa
F – Força aplicada na chapa	N
f – Frequência (número de períodos por segundo)	Hz
$I_{\Delta t}$ - Incerteza do tempo	nanosegundos
I_A – Incerteza do tipo “A”	
I_{L11} - Incerteza referente a constante acustoelástica	
I_t - Incerteza total do processo	
I_{t0} - Incerteza quanto ao tempo de referência	nanosegundos
K – Módulo de volume (constante)	
K_1 - Constante obtida com os dados de cada ensaio a partir das ondas ultra-sônicas	
L_{11} - Constante acustoelástica	
n – Número de amostras	
P- Pressão do manômetro (aplicada na chapa)	bar
T – Período (menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico)	Hz^{-1}

t – Tempo de percurso da onda	nanosegundos
t_{θ} - Tempo de percurso da onda na direção circunferencial	nanosegundos
$t_{(95\%)} -$ Coeficiente tabelado pela função “t Student” para intervalo de 95%	
t_0^* - Tempo de referência em função da distância entre os cabeçotes e do material	nanosegundos
t_0 – Tempo de percurso da onda para tensão zero	nanosegundos
t_r - Tempo de percurso da onda na direção radial	nanosegundos
V - Velocidade de propagação da onda no meio	m/s
V_{θ} - Velocidade da onda na direção circunferencial	m/s
V_{11} - Velocidade de propagação da onda longitudinal no sentido de aplicação da força	m/s
V_A – Velocidade da onda longitudinal no aço no estado livre de tensões	m/s
V_f – Velocidade de fase da onda de Lamb	m/s
V_l - Velocidade longitudinal da onda	m/s
V_r – Velocidades da onda na direção radial	m/s
V_t – Velocidade transversal da onda	m/s
x - Valor da distância percorrida no eixo X em graus	m
Y – Valor da amplitude da onda no eixo Y	m
Z - Impedância acústica	kg/m ² s

Letras Gregas

α - Ângulo de incidência do feixe sônico na peça	graus
λ - Comprimento de onda	m
λ - Constante de Lamé	
μ - Constante de Lamé	
ρ - Densidade do material	kg/m ³
ν - Coeficiente de Poisson	
σ - Tensão	MPa
$\Delta\sigma$ - Variação de tensão	MPa
$\Delta\sigma$ - Variação da tensão em cada ponto	MPa
θ_{cr} – Ângulo crítico da onda longitudinal	graus
σ_p - Desvio padrão da amostra	

λ_t – Comprimento da onda transversal	m
Δt – Variação do tempo de percurso da onda	nanosegundos
Δt_F – Efeito da força aplicada no tempo de viagem da onda	nanosegundos
Δt_{RS} – Efeito da tensão residual no tempo de viagem da onda	nanosegundos
Δt_T – Efeito da diferença de temperatura em relação à temperatura padrão medida	nanosegundos
Δt_{TX} – Efeito da textura do material no tempo de viagem da onda	nanosegundos

Abreviações

I- Incerteza da medição

L_{cr} - Ondas longitudinais criticamente refratadas

ns- nanosegundos

Capítulo 1

Introdução

A quebra de rodas ferroviárias em serviço é um grave problema enfrentado pelas ferrovias. O acidente geralmente resulta em descarrilamentos com grandes perdas materiais e, no caso de transporte de passageiros, com perda de vidas humanas. Muitas ferrovias e institutos de pesquisa desenvolveram métodos de ensaios não destrutivos para prevenir estas ocorrências e retirar as rodas de uso antes que ocorra sua falha. Um dos métodos mais promissores e alternativos para este tipo de inspeção é a medição das tensões no aro das rodas por ultra-som usando transdutores eletromagnéticos ou piezoelétricos. O objetivo principal deste ensaio é detectar a variação das tensões no aro das rodas, que originalmente são de compressão, e que ao longo do tempo podem se transformar em tração, devido principalmente às tensões oriundas da carga térmica transmitida à roda pelo processo de frenagem, levando a roda à trinca e à ruptura, conforme mostra a figura 1.1.

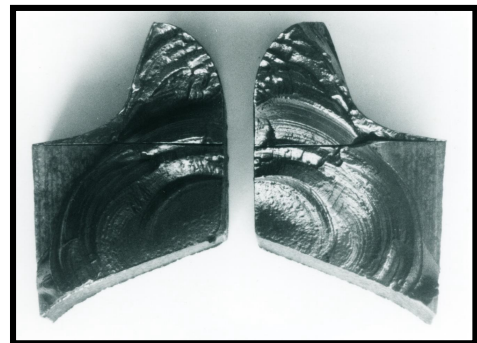


Figura 1.1: Roda quebrada em serviço por trinca térmica

Segundo relatório do National Institute of Standards and Technology, (Schramm et al., Report 28, 1995), a substituição de rodas nos Estados Unidos é um negócio que movimenta US\$ 500 milhões por ano. A maioria destas rodas foram trocadas por estarem no final de vida devido ao desgaste, porém um número significativo destes custos são de rodas condenadas visualmente por suspeita de terem recebido carga térmica anormal durante frenagens severas.

O exame visual empregado com frequência nas ferrovias, muitas vezes leva a decisões erradas pois rodas com tensão de tração ou com micro trincas, podem ser aprovadas em uma inspeção de rotina e serem posteriormente a causa de graves acidentes. A figura 1.2 mostra um acidente ferroviário ocorrido na Bélgica em 1998, com perda de vidas humanas, que teve como causa a quebra de uma roda.



Figura 1.2: Acidente ferroviário na Bélgica em 1998.

As rodas ferroviárias podem ser fabricadas pelo processo de fundição ou de forjamento. Ambos garantem as mesmas características em termos de distribuição de tensões após o término do processo de fabricação, ou seja, as rodas possuem tensão de compressão na região do aro devido ao processo de tratamento térmico (têmpera e revenimento), que inibe a propagação de trincas por fadiga, tornando a roda mais segura.

As rodas forjadas, depois do forjamento e laminação, são austenitizadas e o aro é temperado com água em forma de jato fino. O processo de têmpera do aro resulta na tensão de compressão benéfica, que ajuda a prevenir trincas por fadiga nas rodas em serviço.

O processo de criação da tensão residual de compressão devido à têmpera no aro gera uma deformação plástica permanente, pois no momento que a água atinge o aro quente da roda, ocorre o resfriamento junto com contração interna do material. O aço abaixo da região temperada ainda está quente e tem uma redução do limite de escoamento nesta temperatura. A parte interna do aro e do disco é comprimida pelo resfriamento da parte externa, ocorrendo o escoamento. Durante o resfriamento completo da roda, as fibras internas do aro e do disco estão menores do que estavam originalmente devido à compressão no processo de escoamento, porém algumas áreas tentam ocupar os espaços originais maiores, causando uma tensão na parte interna do aro e disco, enquanto que a parte externa do aro encontra-se sob tensão de compressão.

As rodas em serviço funcionam como tambor de freio e ainda suportam cargas laterais e verticais. Quando os freios são aplicados, a pista da roda é aquecida pelo atrito da sapata de freio. O aço da pista se aquece tentando expandir, mas é contraído pelo corpo da roda mais frio do que o aro. Se a superfície da pista é aquecida a alta temperatura pela frenagem, o aço terá uma redução do limite de escoamento, e uma possível deformação plástica causada pela alternância entre expansão e compressão do aço na zona aquecida. Depois de esfriar e contrair, a continuidade do material deve ser mantida entre o escoamento localizado na superfície da pista de rolamento e a contração remanescente na roda. Neste momento o material da pista de rolamento está tensionado. Em casos severos de frenagem, a reversão completa da tensão pode ocorrer. Esta situação permite a propagação de trincas por fadiga em serviço na área tensionada.

O uso de teste não-destrutivo para medir o estado de tensão do aro de roda trará benefícios para ferrovias, pois o método tradicional destrutivo consiste no corte da roda para verificar se o aro está com tensão de tração ou de contração. O método do ultra-som é uma maneira simples de determinar o estado de tensão de uma roda com as medições feitas no campo ou nas oficinas de manutenção.

Este trabalho trata da medição, com auxílio de transdutores piezoelétricos, de tensões no aro de rodas ferroviárias forjadas novas. As rodas selecionadas para o trabalho são da Classe C (segundo a Association of American Railroads – Section G), com faixa de dureza entre 321 BHN - 363 BHN. As rodas foram fabricadas pela MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, que colaborou com a pesquisa, visando desenvolver um método industrial para medir as tensões residuais de rodas novas na linha de inspeção final, adequando a fábrica às novas exigências dos mercados internacionais, principalmente do Europeu, com a entrada em vigor na nova Norma EN 13262 (European Standard – Annex D), que exige a medição de tensões residuais pelo fabricante.

A técnica aplicada nesta pesquisa é a das ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas L_{cr}), usadas até o momento para avaliar tensões em chapas. Pela primeira vez a técnica está sendo empregada para avaliar tensões em rodas ferroviárias, incluindo o levantamento da constante acustoelástica, para qual se usou a mesma metodologia inovadora.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicação do método ultra-sônico para determinação de tensões em peças forjadas e estudar seu emprego na avaliação de tensões residuais de fabricação em rodas ferroviárias novas.

1.2 Formato da apresentação

Após esta breve introdução, o capítulo 2 apresenta os conceitos básicos sobre o método ultra-sônico, sua aplicação na avaliação de tensões e a revisão bibliográfica histórica sobre o tema.

O capítulo 3, mostra as várias etapas do processo de fabricação de rodas ferroviárias forjadas e suas principais características.

O capítulo 4, materiais e métodos, descreve o componente estudado, método de abordagem do problema e o planejamento experimental.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos e estes são discutidos à luz dos objetivos propostos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e a recomendação para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos e Revisão da Literatura

Este capítulo contém os princípios básicos de ultra-som, contemplando a parte de propagação das ondas, transdutores, tipos de ultra-som e características dos cristais piezoelétricos. Nesta parte do trabalho, foram descritos também os princípios envolvidos na medição de tensão por ultra-som, teoria acustoelástica e o fenômeno da birrefringência. Os conceitos exibidos neste capítulo foram obtidos por meio da revisão bibliográfica, que contempla vários artigos e livros relacionados com a avaliação de tensões no aro de rodas ferroviárias por ultra-som. Este capítulo foi escrito usando as referências bibliográficas Rodrigues et al., (2000).

2.1 Teoria Ondulatória

Denomina-se onda uma perturbação que se propaga em um meio. Quando duas pessoas seguram as extremidades opostas de uma corda flexível e uma delas a movimenta bruscamente para cima e para baixo, provoca-se neste ponto uma perturbação. Este movimento origina uma sinuosidade, que se transmite ao longo da corda no sentido da outra pessoa. Isto explica porque um abalo produzido em um meio elástico propaga-se progressivamente a todos os pontos deste meio.

A perturbação denomina-se pulso e o movimento do pulso constitui uma onda. A mão da pessoa que movimentou a extremidade é a fonte e a corda é o meio onde a onda se propaga. Uma série contínua de abalos produz o trem de ondas.

a) Propagação das Ondas

Um pedaço de cortiça flutuando na superfície da água na qual se atirou uma pedra, não será transportado pela onda durante a sua passagem, porque as partículas do meio em que se propagam as ondas não se deslocam. Verifica-se que o pedaço de cortiça movimenta-se para cima e para baixo, para frente e para trás; isto é, executa um movimento oscilatório sem sair do lugar. O fato da cortiça se movimentar indica que a onda lhe cedeu energia. Esta é uma característica das ondas que ocorrem na natureza, uma onda transfere energia de um ponto a outro, sem transportar matéria entre eles.

b) Natureza das Ondas

Quanto à natureza, as ondas se classificam em mecânicas e eletromagnéticas. Ondas mecânicas são aquelas originadas pela deformação de uma região de um meio elástico. Para se propagarem, necessitam de um meio material; logo, as ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

O som é um fenômeno acústico que consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo, que vibra em um meio material elástico. As ondas sonoras propagam-se nos sólidos, líquidos e gases, sendo fundamentais para o estudo do ultra-som.

As ondas eletromagnéticas são originadas por cargas elétricas oscilantes; propagam-se no vácuo e nos meios materiais.

As ondas são periódicas quando seguem uma à outra em sucessão regular e se repetem identicamente em intervalos de tempos iguais.

Na acústica são descritos os fenômenos relacionados com as oscilações mecânicas (vibrações), que originam as ondas sonoras, bem como, a propagação dessas ondas nos sólidos, líquidos e gases. As ondas sonoras são periódicas, sendo classificadas em audíveis e inaudíveis, dependendo do número de períodos que ocorram na unidade de tempo (frequência).

Quando as ondas sonoras possuem frequência entre 20 Hz e 20 MHz, são percebidas pelo ouvido humano; neste caso existe o fenômeno acústico denominado som. Quando as ondas possuem frequências inferiores a 20 Hz, são inaudíveis; neste caso o fenômeno acústico denomina-se infra-som. Quando as ondas possuem frequências superiores a 20 MHz também são inaudíveis e o fenômeno é chamado de ultra-som.

Para aplicação geral em ensaios de materiais utiliza-se preferencialmente a faixa de frequência entre 0,5 MHz e 15 MHz. A figura 2.1 mostra o espectro das frequências sonoras.

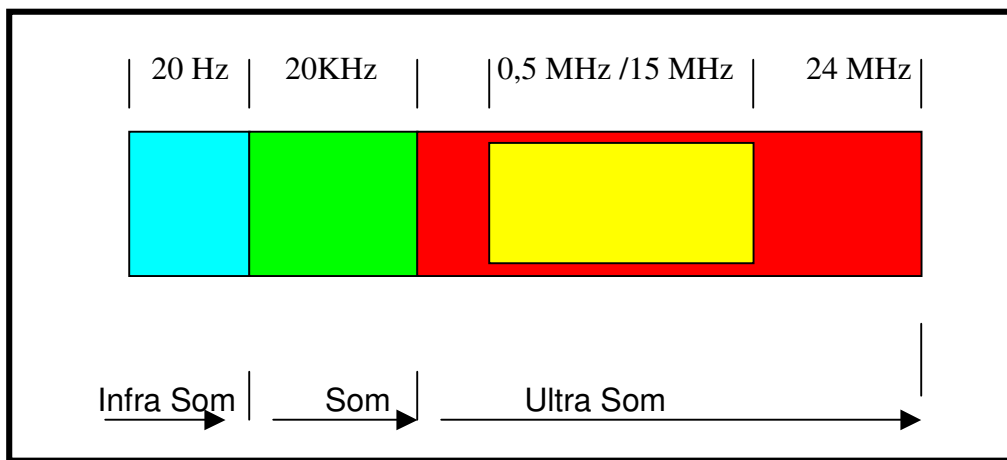


Figura 2.1: Espectro das frequências sonoras.

c) Movimento Periódico

As oscilações mecânicas (ou vibrações) produzem ondas periódicas, as quais geram uma curva harmônica. Nestes tipos de oscilações, as partículas do meio executam um movimento harmônico em torno da posição de repouso. A figura 2.2 mostra a forma de uma onda periódica com suas características.

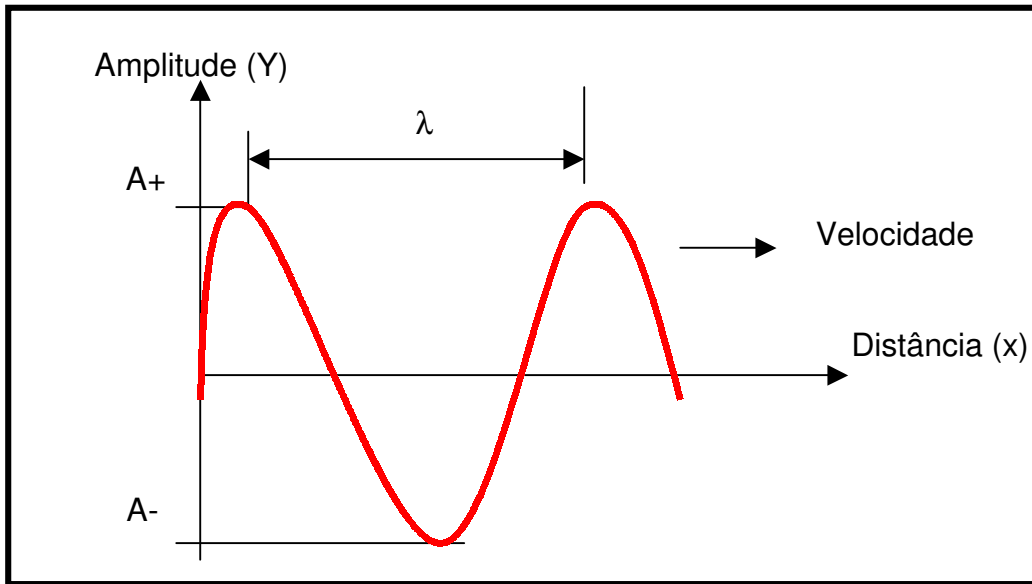


Figura 2.2: Características da onda periódica.

As relações apresentadas a seguir, relacionadas à figura 2.2, são aplicáveis às ondas periódicas e, conseqüentemente, às ondas ultra-sônicas.

$$Y = A \text{ sen } (x) \quad (2.1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

$$V = \lambda f \quad (2.3)$$

Onde:

A – Amplitude da onda (valor máximo da crista da onda no eixo Y);

Y – Valor da amplitude da onda no eixo Y;

x- Valor da distância percorrida no eixo X em graus;

λ - Comprimento de onda (distância entre duas cristas ou vales consecutivos).

T – Período (menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico). Pode ser definido como tempo em que a onda gasta para completar a distância “ λ ”;

f – Frequência (número de períodos por segundo);

V- Velocidade de propagação da onda no meio.

2.2 Interferência de Ondas

Interferência é o fenômeno de superposição de duas ou mais ondas. Num mesmo meio, duas ou mais ondas se superpõem provocando o fenômeno denominado “interferência ondulatória”. A interferência de duas ou mais ondas poderá resultar numa terceira onda (resultante) cuja amplitude poderá ser maior ou menor do que a das ondas componentes.

2.3 Ressonância

Ressonância é o fenômeno pelo qual um corpo vibra ao ser atingido por vibrações produzidas por um outro corpo. O fenômeno acontece quando o período das vibrações excitadas pelo primeiro corpo coincide com o período natural de vibrações do segundo, ou com o período de um dos harmônicos, ou seja, quando a frequência de vibração induzida (externa) no corpo coincide com sua frequência natural.

Aplicando-se uma vibração ultra-sônica num corpo a ser ensaiado, dependendo das características acústicas desse corpo, ele entrará em ressonância na medida em que o período da vibração aplicada se aproxime do seu período natural de vibração.

2.4 Efeito Piezoelétrico e Efeito Lippmann

O efeito Piezoelétrico é um fenômeno que ocorre com os cristais anisotrópicos, nos quais desenvolvem-se cargas elétricas quando os cristais são submetidos a deformações mecânicas. Este fenômeno foi descoberto por Pierre e Jaques Currie em 1880 e manifesta-se da seguinte forma: aplicando-se cargas mecânicas nas duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo, ocorre a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias nessas faces, isto é, em uma das

faces formam-se cargas positivas e, na outra, cargas negativas. Experiências mostraram que as cargas elétricas desenvolvidas na lâmina de cristal são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas.

O efeito Lippmann é contrário ao Piezoelétrico. Neste caso, se observam deformações mecânicas nos cristais quando são submetidos a tensões elétricas. O fenômeno se manifesta aplicando-se nas faces do cristal cargas opostas, positivas (de um lado) e negativas (outro lado). Estas cargas, provocam uma deformação no cristal, análoga à deformação sofrida pela lâmina no Efeito Piezoelétrico. Aplicando-se uma tensão V a uma lâmina de cristal piezoelétrico, ocorre uma deformação “ u ” (expansão) positiva na espessura da lâmina. Invertendo -se a polaridade da tensão, ocorre também uma inversão na deformação, isto é, uma contração (deformação negativa).

Se for aplicada uma tensão alternada na lâmina de cristal, ela sofrerá deformações sucessivas, passando a vibrar. A lâmina se contrairá na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência de vibração mecânica será a mesma da tensão alternada. Se a lâmina for cortada do bloco de cristal, de tal forma que sua frequência de vibração natural coincida com a frequência de vibração ou tensão que lhe foi aplicada, ocorrerá o fenômeno da ressonância na lâmina e a amplitude da vibração será máxima.

Neste caso existe a transformação de energia elétrica em mecânica. Todos os dispositivos que transformam uma espécie de energia em outra são chamados de transdutores. No equipamento de ultra-som o efeito Lippmann é usado para gerar ultra-sons. Os transdutores, ou cabeçotes, podem gerar vibrações mecânicas de alguns ciclos por segundo (Hertz), até cerca de 25.000.000 de ciclos por segundo (25 MHz). A faixa do ultra-som industrial é de 0,5 MHz a 15 MHz.

Os ultra-sons são usados principalmente em ensaios para detecção de discontinuidades no interior de peças metálicas. Para isto, coloca-se o cabeçote com uma das faces sobre a peça metálica, alimentando-o com uma corrente elétrica alternada com a frequência desejada. A

lâmina de cristal entrará em vibração e o dispositivo funcionará como um transmissor ou emissor de ultra-som, que penetrará na peça transmitindo-lhe uma vibração mecânica de alta frequência.

Reciprocamente, se ao mesmo dispositivo (sem corrente elétrica) for colocado sobre a superfície do metal e esta estiver vibrando, a vibração se transmitirá pelo contato com a lâmina cristalina, a qual sofrerá deformações sucessivas, que darão origem a cargas elétricas de polaridades contrárias em suas faces. Quando o dispositivo funciona desta forma é chamado de receptor. O dispositivo além de transformar energia elétrica em mecânica, transforma também energia mecânica em elétrica. Quando o transdutor é usado com esta dupla função recebe o nome de emissor – receptor.

O quartzo cristalino é um prisma de seis faces, com uma pirâmide em cada base. Todo cristal exhibe o fenômeno da birrefringência (dupla refração), porém há uma direção privilegiada em que não a exhibe a do eixo óptico do cristal. As lâminas dos cristais de quartzo são cortadas na direção do seu eixo óptico. O quartzo cristalino tem seu eixo óptico coincidindo com uma reta que une os vértices das pirâmides opostas. A figura 2.3 representa um cristal de quartzo com o eixo óptico marcado pela direção Z. Além deste eixo, existem os eixos ou direções X que passam através de arestas opostas, e eixos ou direções Y que passam pelo centro de faces opostas. Existem 3 eixos X e 3 eixos Y em um cristal de quartzo.

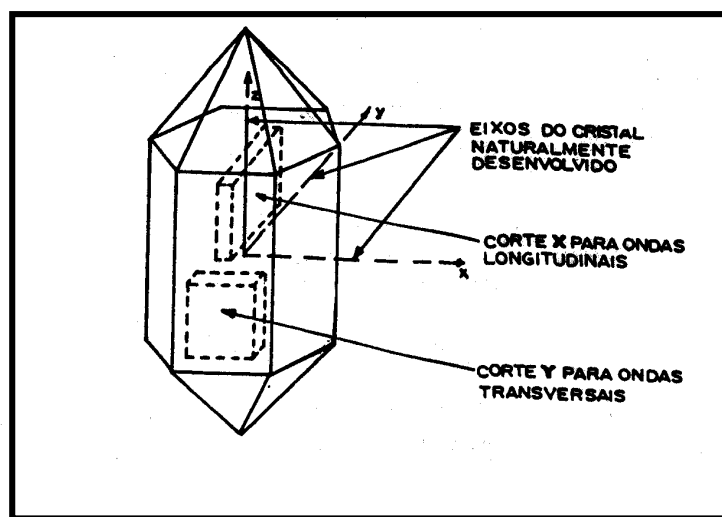


Figura 2.3: Cristal de quartzo com os eixos ópticos principais (Rodrigues et al., 2000).

Tanto os eixos X como os Y são perpendiculares ao eixo Z do cristal de quartzo. As lâminas de cristais de quartzo são cortadas segundo os eixos X e Y. Outros cristais, além do cristal de quartzo, possuem também características piezoelétricas e são usados em transdutores de ultra-som, tais como:

- Titanato Zirconato de Chumbo – Possui alto módulo piezoelétrico com grande capacidade de emissão e de amortecimento. É recomendado para ensaios de penetrabilidade.
- Titanato de Bário – Um dos mais eficientes na emissão acústica, porém fica limitado à utilização em frequências abaixo de 15 MHz. São os mais empregados na inspeção de soldas e materiais forjados.
- Sulfato de Lítio – É um cristal produzido artificialmente, com grande capacidade de amortecimento, porém é solúvel em água e sua aplicação se limita a temperaturas inferiores a 75 °C. Este tipo de cristal é o mais empregado em aplicações médicas.
- Metaniobato de Chumbo – Este cristal possui estabilidade em altas temperaturas e módulo piezoelétrico elevado, porém possui baixa velocidade sônica e baixa resistência mecânica sendo empregado em casos de frequência elevada.

2.5 Incidência das Ondas Ultra-Sônicas em Diferentes Meios de Propagação

Quando ondas ultra-sônicas longitudinais propagando-se em um meio “1”, incidem perpendicularmente em uma interface de mudança para o meio “2”, algumas relações matemáticas são válidas. Cada anteparo ou mudança do meio de propagação recebe o nome de interface. Um mesmo meio pode ter várias interfaces, sendo desta forma chamado de meio descontínuo.

Quando a onda-sônica passa de um meio 1 para um meio 2, apenas uma característica fica constante: a frequência. A figura 2.4 mostra o conceito de onda incidente e refletida em diferentes meios.

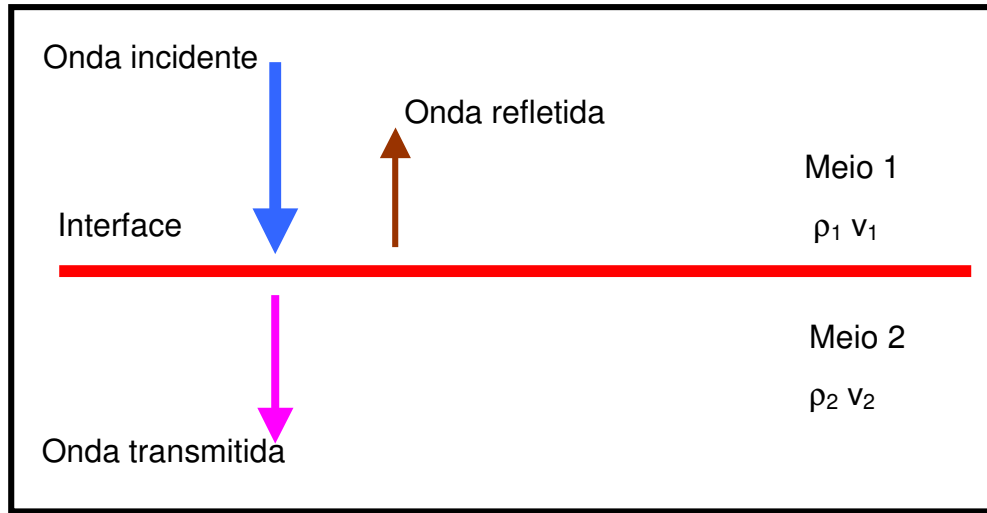


Figura 2.4: Ondas incidentes e refletidas em diferentes meios.

As características acústicas do meio 1 são $\rho_1 v_1$, onde ρ_1 é a densidade do meio 1 e v_1 a velocidade da onda neste meio; de modo análogo, as características do meio 2 são $\rho_2 v_2$. Considerando as características acústicas dos dois meios, algumas relações matemáticas podem ser obtidas entre as amplitudes das ondas refletidas e transmitidas, e a amplitude da onda incidente.

Considerando “A” como amplitude da onda incidente, “B” como amplitude da onda refletida e “C” como amplitude da onda transmitida, as amplitudes “B” e “C” podem ser escritas em função de “A” (Rodrigues et al., 2000):

$$B = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} A \quad (2.4)$$

$$C = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} A \quad (2.5)$$

As equações 2.4 e 2.5 foram estabelecidas em função das amplitudes das ondas ultrassônicas no meio. A condição de maior interesse no emprego do ultra-som é aquela em que a amplitude da onda transmitida de um meio 1 para um meio 2 é máxima, condição em que a amplitude da onda refletida é mínima. Nesta condição a potência transmitida é máxima e, numa situação ideal, a amplitude da onda refletida deve ser igual a zero ($B = 0$). Logo, pode-se obter a equação 2.6.

$$0 = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} A \quad \Longrightarrow \quad \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (2.6)$$

A quantidade de energia refletida ou transmitida por uma onda é definida como impedância acústica (Z), que é igual ao produto das duas características acústicas: a densidade do meio e a velocidade de propagação da onda, conforme a equação 2.7.

$$Z = \rho V \quad (2.7)$$

Para uma transmissão máxima de energia (ou intensidade sonora) de um meio para outro, considerando um caso ideal, é necessário que as impedâncias acústicas dos dois meios sejam iguais, condição necessária para que a reflexão da onda seja nula, conforme a equação 2.6. A equação 2.8 mostra esta relação:

$$Z_1 = Z_2 \quad (2.8)$$

No caso prático, sempre tem-se diferença de impedância entre os meios, porém, para uma transmissão máxima de energia, é necessário que as impedâncias entre os meios sejam mais próximas possível. Para que isto aconteça, normalmente é usado um acoplante entre o transdutor e a peça. A escolha do acoplante correto é muito importante para o desempenho do ensaio de ultra-som, estando diretamente relacionado com a sua precisão. A seguir, estão listadas as impedâncias acústicas de alguns materiais mais usados no ensaio de ultra-som, bem como de

acoplantes. Nesta relação pode-se observar que a transmissão máxima ocorrerá para os meios glicerina / aço, pois a glicerina é o acoplante que tem a impedância acústica mais próxima do aço.

$$Z_{\text{água}} = 1,5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{ar}} = 430 \text{ kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{aço}} = 4,7 \times 10^7 \text{ kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{óleo}} = 1,1 \times 10^6 \text{ kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{glicerina}} = 2,4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2.\text{s}$$

As impedâncias acústicas permitem calcular as taxas de reflexão (R) e de transmissão (T) de uma onda, conforme as equações (2.9 e 2.10) (Rodrigues et al., 2000).

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.9)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.10)$$

2.6 Leis da Reflexão

Um dos mais importantes tópicos associados à medição de tensões por ultra-som, são os fenômenos associados às leis de reflexão. A velocidade de uma onda refratada depende da velocidade no meio e do ângulo de incidência da onda no meio.

Quando uma onda incide em uma interface de separação entre um meio 1 e 2, com uma determinada inclinação, parte desta onda é refratada para o meio 2, com componentes longitudinais e transversais, e parte é refletida para o meio 1, também com componentes longitudinais e transversais.

A figura 2.5 mostra uma onda longitudinal (XY) incidindo obliquamente na interface entre o meio 1 e o meio 2, segundo a direção XY. A onda longitudinal é refletida e refratada segundo as direções YW e YZ, respectivamente, para os meios 1 e 2. A incidência oblíqua da onda XY origina duas outras ondas transversais, que se propagam segundo as direções YW' e YZ', em 1 e 2. Este fenômeno ocorre, nas bordas ou interface dos dois meios.

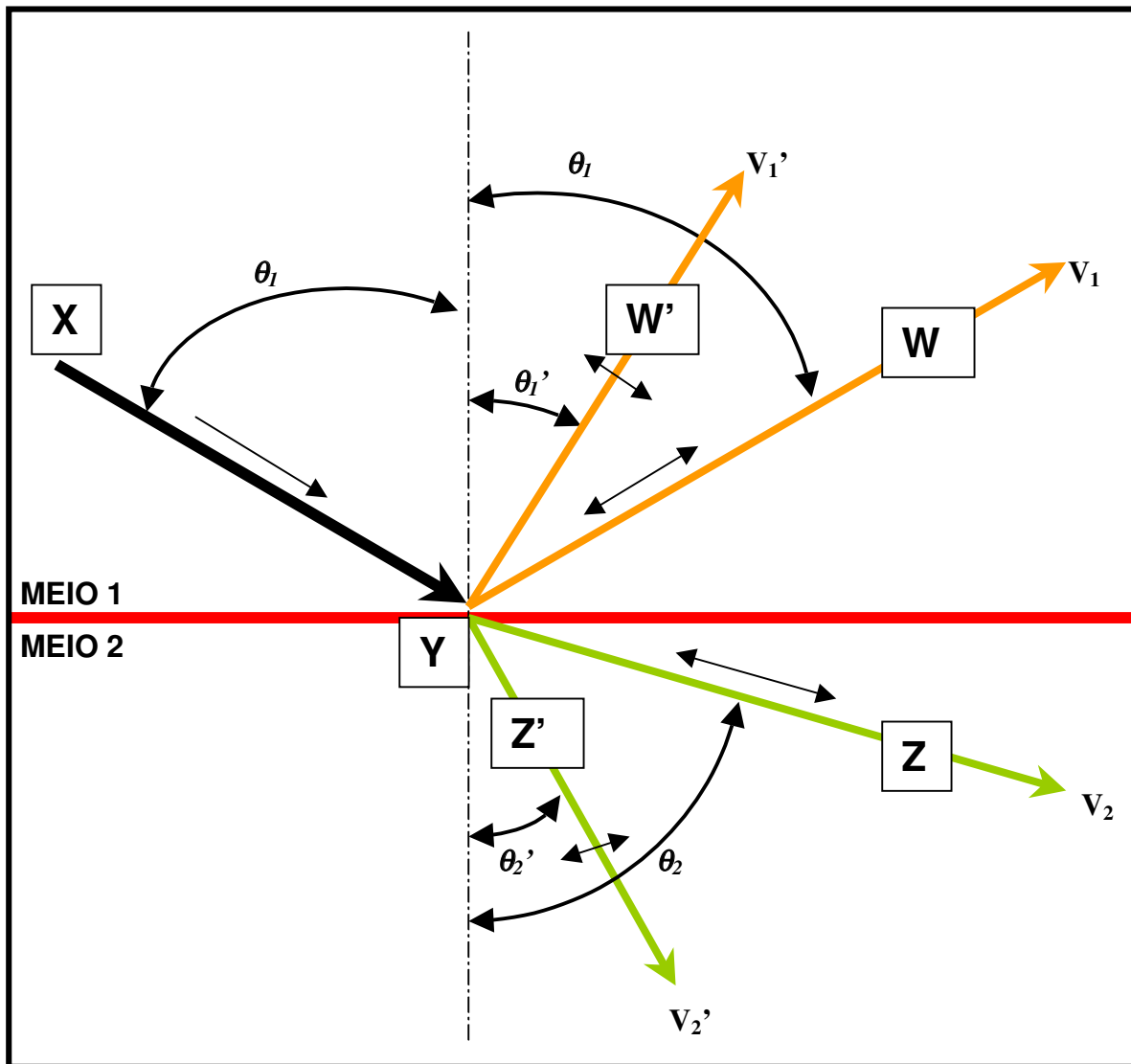


Figura 2.5: Ondas refratadas e refletidas nos meios 1 e 2

A figura 2.5 mostra ainda as seguintes grandezas:

V_1 – Velocidade de propagação da onda longitudinal refletida no meio 1 (YW);

V_2 – Velocidade de propagação da onda longitudinal refratada no meio 2 (YZ);

V_1' – Velocidade de propagação da onda transversal refletida no meio 1 (YW');

V_2' – Velocidade de propagação da onda transversal refratada no meio 2 (YZ').

Na incidência oblíqua das ondas ultra-sônicas, duas importantes ocorrências acontecem com a conversão dos modos de vibração, que são muito importantes no projeto de cabeçotes de ondas longitudinais. Na interface de separação dos dois meios no qual incide obliquamente uma onda, sendo o meio 1 líquido e o meio 2 sólido, ocorre que V_2 é maior que V_1 . Este fato acontece porque a velocidade V_2 da onda longitudinal refratada é maior do que V_1 da onda longitudinal refletida. Este fato faz com que haja um desvio da onda refratada YZ, que se afasta da normal fazendo com que θ_2 (refração) seja maior que θ_1 (reflexão). Portanto, a condição será:

$$\text{Se } V_1 > V_2 \quad \Rightarrow \quad \theta_2 > \theta_1$$

a) Lei de Snell

A Lei de Snell é muito usada na área de acústica, pois relaciona as velocidades com os ângulos de incidência, refração e reflexão das ondas. Esta relação é fundamental no estudo das ondas superficiais, que requerem um cálculo preciso do ângulo de incidência para serem geradas na superfície da peça.

A Lei de Snell é dada pela equação 2.11:

$$\frac{V_1}{\sin \theta_1} = \frac{V_2}{\sin \theta_2} = \frac{V_2'}{\sin \theta_2'} = \frac{V_1'}{\sin \theta_1'} \quad (2.11)$$

b) Ângulos Críticos

Quando o ângulo θ_1 da onda incidente XY aumenta, a onda refratada YZ fica mais perto

da superfície, até que, em determinado momento, θ_2 fica igual a 90° , gerando uma onda longitudinal superficial. Este ângulo de incidência θ_1 , necessário para tornar θ_2 igual a 90° , é chamado de primeiro ângulo crítico. A figura 2.6 mostra a formação do primeiro ângulo crítico.

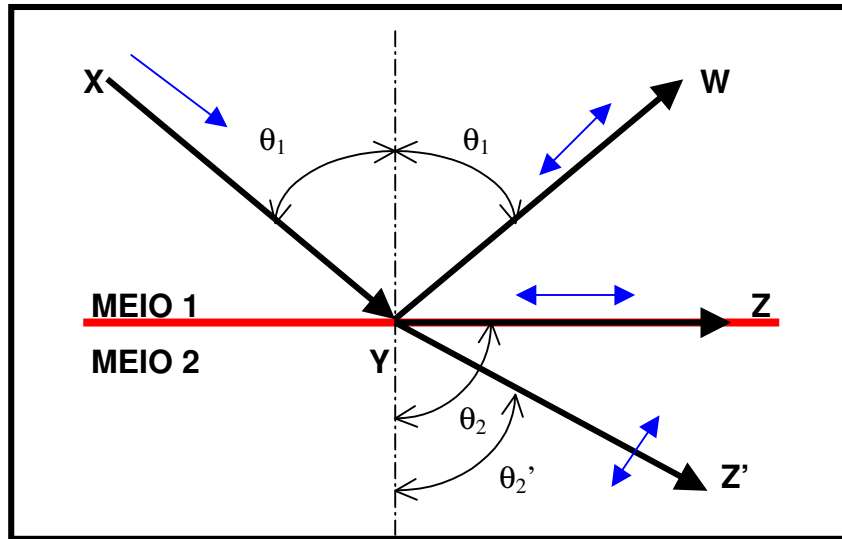


Figura 2.6: Primeiro ângulo crítico (θ_2).

Se continuar aumentando o ângulo de inclinação da onda incidente θ_1 , a onda refratada transversal YZ' ficará mais perto da superfície da peça. Quando o ângulo de incidência θ_1 for suficiente para que θ_2' seja igual a 90° , ter-se-á a formação do segundo ângulo crítico. A figura 2.7 mostra a formação do segundo ângulo crítico.

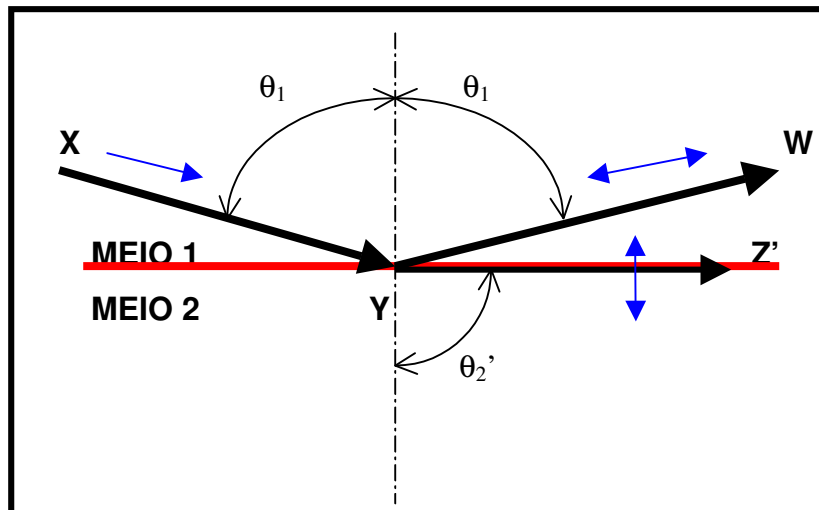


Figura 2.7: Segundo ângulo crítico.

Nos cabeçotes de ondas transversais (cisalhantes), o cristal deve ser posicionado de tal modo que o ângulo de incidência da onda fique entre o primeiro e o segundo ângulo crítico, pois desta forma a onda refratada no material será apenas do tipo transversal, evitando erros de interpretação visto que tais ondas possuem velocidades diferentes.

2.7 Ondas Ultra-Sônicas

Qualquer onda provoca oscilações das partículas do meio em que se propaga. A passagem da onda ultra-sônica pelo meio de propagação faz com que as partículas que compõem este meio executem um movimento de oscilação em torno da sua posição de equilíbrio, cuja amplitude irá diminuindo gradativamente em decorrência da perda de energia da onda.

Considerando que o meio de propagação é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem não estão rigidamente ligadas entre si e podem oscilar em qualquer direção, pode-se classificar as ondas ultra-sônicas em três tipos: longitudinais, transversais e superficiais.

a) Ondas Longitudinais

Uma onda é longitudinal, quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio. Neste caso os planos de partículas do meio de propagação não mantêm as mesmas distâncias uns dos outros, conforme mostra a figura 2.8.

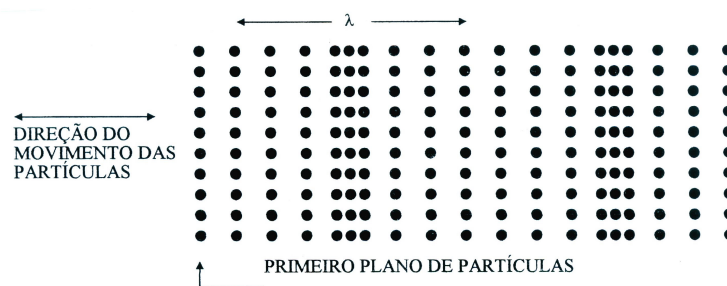


Figura 2.8: Planos de propagação da onda longitudinal (Rodrigues et al., 2000).

Ao ser aplicada uma onda ultra-sônica longitudinal num meio elástico, o primeiro plano de partículas desse meio é comprimido por ação do impacto da onda, que transmite a energia cinética recebida sucessivamente para os próximos planos de partículas, os quais entram em vibração. Deste modo, todo o meio elástico vibra e, no caso da onda longitudinal, esta vibração ocorre na mesma direção de propagação da onda. Aparecem em sucessão, zonas de compressão e de rarefação. As distâncias entre cada duas compressões ou entre duas diluições determinam o comprimento de onda.

As ondas longitudinais propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. Estas ondas possuem altas velocidades de propagação, variando conforme o meio:

Aço..... $V_l = 5900 \text{ m/s}$

Água..... $V_l = 1480 \text{ m/s}$

Ar..... $V_l = 330 \text{ m/s}$

Plexiglass..... $V_l = 2670 \text{ m/s}$

b) Ondas Transversais

Uma onda é transversal quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Neste caso, os planos de partículas no meio de propagação mantêm a mesma distância uns dos outros, conforme a figura 2.9.

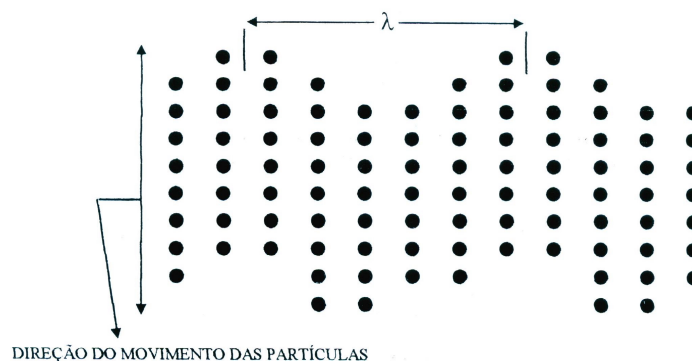


Figura 2.9: Plano de propagação da onda transversal (Rodrigues et al., 2000).

As ondas transversais não se propagam nos líquidos e gases, pois nestes meios não há ligações mecânicas. As velocidades para as ondas transversais no aço e alumínio são:

Aço..... $V_t = 3230$ m/s

Alumínio..... $V_t = 3130$ m/s

A frequência “f” indica o número de vibrações por segundo feito pelas partículas. Portanto, a equação 2.3 que se refere à correlação entre comprimento da onda, velocidade do som e frequência, também é válida neste caso. Porém, deve-se trabalhar com a velocidade transversal, logo:

$$V_t = f \lambda_t \quad (2.12)$$

Onde:

V_t – Velocidade transversal da onda;

f - Frequência da onda transversal;

λ_t – Comprimento da onda transversal.

c) Ondas Superficiais e Sub-superficiais

As ondas superficiais podem ser geradas por diferentes técnicas. Um feixe de ondas de um cabeçote de ondas transversais pode ser colocado na superfície da peça gerando ondas superficiais. Outra técnica utilizada é colocar uma sapata para inclinar o cabeçote fazendo com a onda percorra a superfície da peça; neste caso a onda terá uma velocidade V_1 na sapata e uma velocidade V_2 no material. Uma terceira possibilidade seria usar o cabeçote tipo “cabeçote estratificado” (array probe) ou cabeçote combinado, que possui vários cristais pequenos fixados em um pente com vários ângulos de incidência. Uma quarta opção seria usar um refletor com um cabeçote normal, fazendo com que a onda seja gerada no refletor e se propague até a peça, gerando ondas superficiais.

c.1) Ondas de Rayleigh

São ondas que se propagam à semelhança das ondas na superfície das águas. Apresentam um movimento elíptico e se propagam exclusivamente na superfície de um sólido cuja espessura seja maior que o comprimento de onda, conforme a figura 2.10:

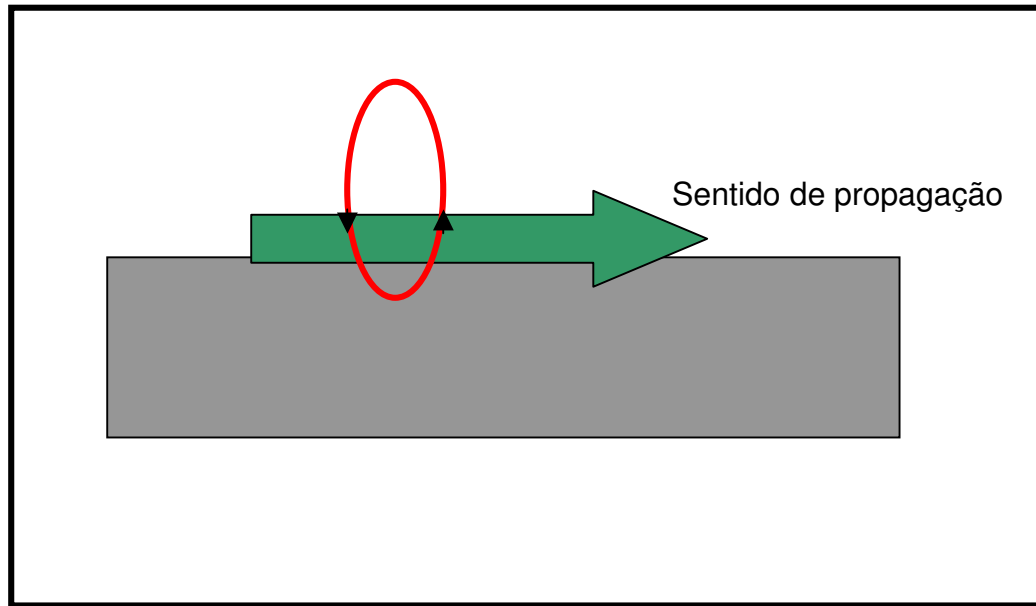


Figura 2.10: Propagação da onda de Rayleigh.

Neste tipo de onda, o movimento das partículas é tanto longitudinal como transversal em relação à direção do feixe. A velocidade de propagação das ondas de Rayleigh é aproximadamente 10% inferior à de uma onda transversal no mesmo material.

c.2) Ondas de Love

Propagam-se na superfície do material sem componente normal. Apresentam um movimento paralelo à superfície e transversal em relação à direção de propagação do feixe. Sua aplicação restringe-se à inspeção de camadas finas de materiais que foram recobertos por outro de maior impedância acústica, como por exemplo: chapas galvanizadas com eletrodeposição. A figura 2.11 mostra a propagação da onda de Love.

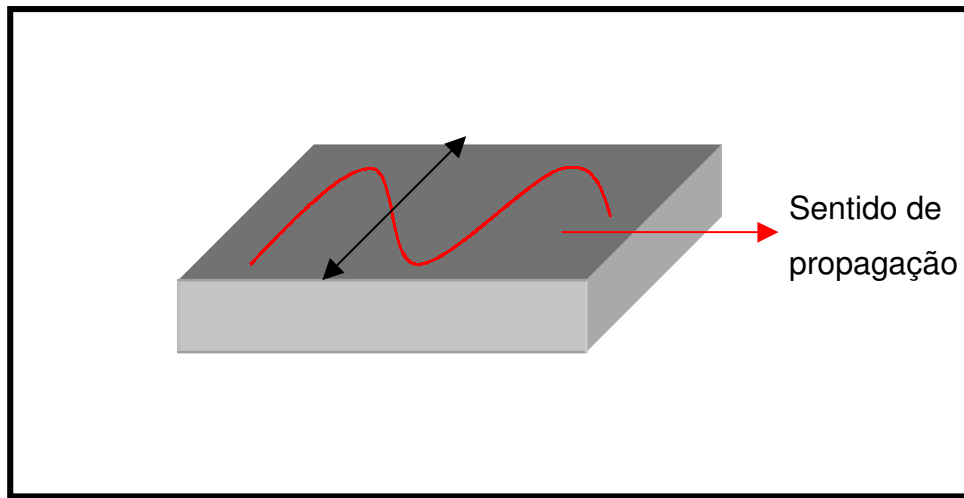


Figura 2.11: Propagação da onda de Love.

c.3) Ondas de Lamb

As ondas de Lamb, mostradas na figura 2.12, ocorrem quando a espessura do material é comparável ao comprimento de onda. A aplicação destas ondas ocorre na detecção de discontinuidades internas e superficiais. As ondas de Lamb são geradas em chapas finas, por meio de ondas longitudinais de velocidade e frequência pré-determinada, e transmitidas sob um ângulo de incidência conforme:

$$\text{Sen } \alpha = V_l / V_f \quad (2.13)$$

Onde:

α - Ângulo de incidência do feixe sônico na peça;

V_l – Velocidade da onda longitudinal incidente;

V_f – Velocidade de fase da onda de Lamb desejada, em função da frequência e espessura da chapa a ser testada.

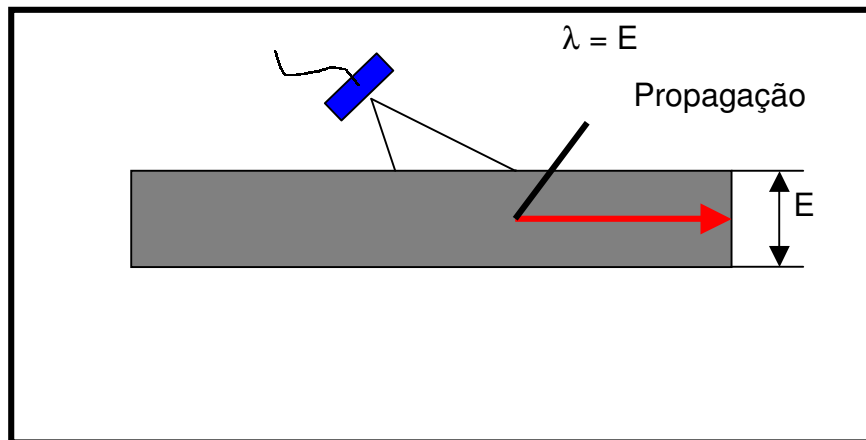


Figura 2.12: Propagação da onda de Lamb.

As ondas de Lamb são classificadas em simétricas e assimétricas, sendo que cada modo se propaga com uma velocidade de fase, que depende da espessura da chapa e da frequência.

c.4) Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr})

As ondas longitudinais criticamente refratadas recebem vários nomes na literatura inglesa, dentre as quais pode-se citar: ‘subsurface elastic waves’, ‘head waves’, ‘creeping waves’ e ‘lateral waves’.

As ondas L_{cr} ocorrem em um campo de ondas longitudinais excitadas em um sólido à meia distância do ângulo do feixe sônico do cabeçote, com ângulo de incidência perto do primeiro ângulo crítico. Este tipo de onda tem sido largamente empregado na detecção de defeitos sub-superficiais em materiais isotrópicos.

A teoria estabelece que no primeiro ângulo crítico, ou perto dele, para ondas longitudinais incidindo numa interface (líquido-sólido ou sólido-sólido), vindo de um meio de menor velocidade da onda longitudinal, coexistem dois tipos de ondas: as sub-superficiais e as ondas frontais. As duas ondas satisfazem as condições de contorno na face livre do sólido, onde todas as tensões são supostamente iguais a zero. Qualquer distúrbio na face livre, se move com velocidade igual à da onda longitudinal no sólido. A amplitude deste deslocamento diminui com

o aumento da distância, conforme a relação $(1/r^n)$, onde “ r ” é a distância e “ n ” varia de 1,5 a 2,0. Este fato indica que estas ondas são fortemente atenuadas comparadas com as ondas de volume, nas quais o índice “ n ” varia de 0,5 a 1,0. As ondas sub-superficiais podem ser detectadas em qualquer ponto da superfície; porém, o cabeçote receptor precisa estar com uma inclinação igual à do primeiro ângulo crítico.

Uma característica das ondas superficiais é a distribuição de amplitude da pressão acústica no plano de incidência. Esta forma de distribuição do campo de pressão revela que a máxima sensibilidade acontece quando os raios estão em um ângulo de 10° a 20° da superfície livre, conforme a figura 2.13. Esta propriedade faz com que as ondas L_{cr} sejam pouco sensíveis a defeitos superficiais e à rugosidade do material.

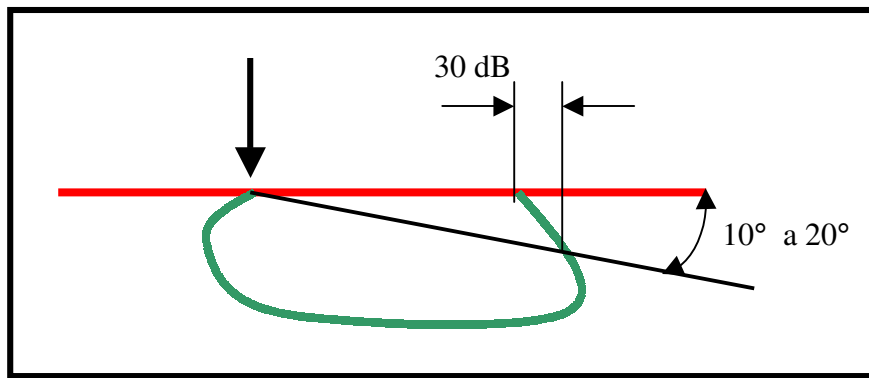


Figura 2.13: Distribuição do campo de pressão das ondas L_{cr}. (Rose, 1999).

A definição das ondas L_{cr} está relacionada com o primeiro ângulo crítico, o qual, para meios isotrópicos, é calculado pela lei de Snell (2.11). Assim, o ângulo crítico (θ_{cr}) é dado pela expressão (2.14), na qual V_1 é a velocidade da onda no meio 1 e V_2 no meio 2. A figura 2.14, mostra as ondas frontais incidindo no ângulo crítico (Rose, 1999).

$$\theta_{cr} = \text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2.14)$$

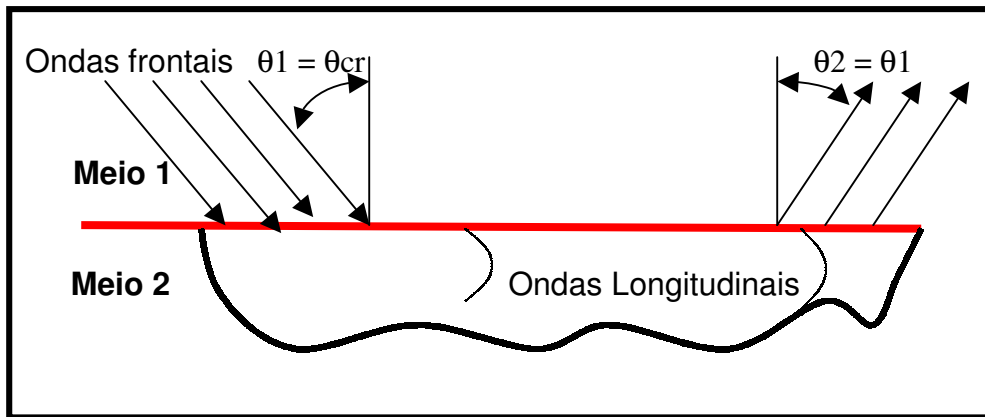


Figura 2.14: Ângulo crítico com ondas frontais e longitudinais (Rose, 1999).

2.8 Transdutores ou Cabeçotes

Os transdutores ou cabeçotes possuem basicamente um cristal piezoelétrico em seu interior, envolto por uma capa metálica responsável pela proteção, com conectores elétricos que têm a função de conectar o cabeçote ao aparelho de ultra-som para geração de excitação alternada, fazendo desta forma com que o cristal vibre emitindo ondas sônicas. Dentro da armação ainda existe um bloco amortecedor, para impedir que o cabeçote continue vibrando depois de cessar os pulsos elétricos. Na parte inferior do cabeçote existe uma proteção, para impedir o contato direto do cristal com a peça.

Os cabeçotes são classificados em três grandes categorias: os normais, os angulares e os SE (emissor e receptor). Dentro de cada categoria os cabeçotes podem ser de contato direto ou por imersão. Os cabeçotes de contato direto trabalham muito próximos da peça, porém separados por uma fina camada de acoplante; já os de imersão trabalham dentro do acoplante (geralmente a água), ficando distantes da peça. Os cabeçotes por imersão normalmente são usados em máquinas automáticas de ultra-som construídas para trabalhos específicos.

Cabeçote normal – Este cabeçote se caracteriza pela direção na qual o som entra na peça (perpendicular à superfície da peça). Geralmente são circulares com diâmetro do cristal de 5 a 25 mm, figura(2.15, e frequências de 0,5 a 6 MHz.

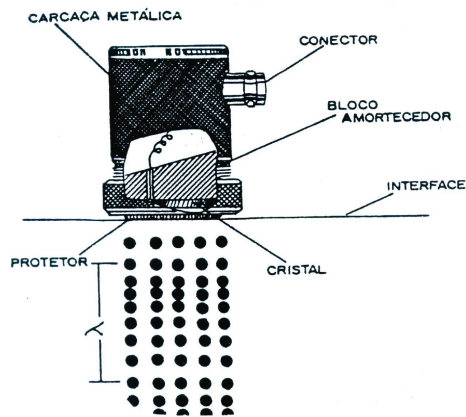


Figura 2.15: Cabeçote de ultra-som do tipo normal (Krautkramer, 2003).

Cabeçote angular – O cabeçote angular é composto de um cristal piezoelétrico que oscila colado em uma cunha de plexiglass (tipo de plástico). Esta montagem faz com que a onda incida obliquamente na peça gerando ondas transversais. As parcelas refletidas do som, que permanecem no plexiglass, são absorvidas por um corpo amortecedor, se transformando em calor. Estas ondas são impedidas de voltar ao cristal e de atrapalhar a leitura dos ecos, pela forma geométrica da cunha de plexiglass. Os cabeçotes angulares normalmente são empregados em ensaios de peças soldadas e em áreas de difícil acesso, pois devido ao fato do feixe sônico ser emitido em ângulo, o cabeçote pode se posicionar a uma certa distância da área a ser inspecionada. A figura 2.16 mostra alguns tipos de cabeçotes angulares.

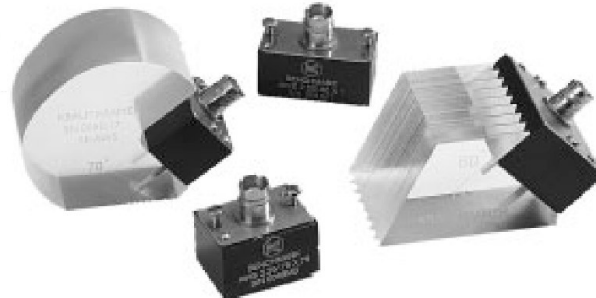
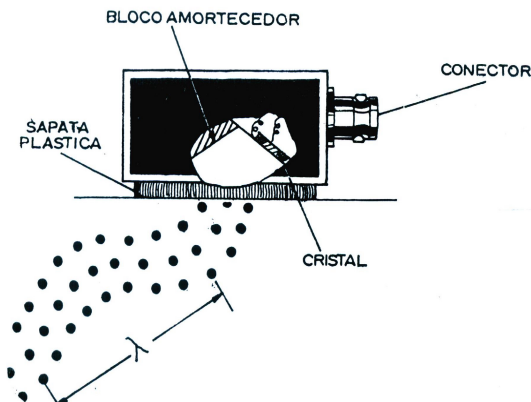


Figura 2.16: Cabeçotes angulares.(Krautkramer, 2003).

Na figura 2.16 pode-se notar dois tipos de cabeçotes angulares: do lado esquerdo, o cabeçote angular tem a sapata de acrílico embutida em seu corpo, para gerar as ondas transversais, e do lado direito mostra a sapata de acrílico montada externa ao cabeçote. Esta construção tem a vantagem de com um mesmo cabeçote, poder variar o ângulo de incidência da onda com a simples mudança da sapata de acrílico.

Cabeçote SE – Os cabeçotes tipo SE possuem duplo cristal, um emissor e outro receptor, dentro de uma mesma carcaça. Os cristais estão montados juntos, mas são totalmente diferentes uns dos outros, do ponto de vista elétrico e acústico. Entre o oscilador e a peça estão localizados os blocos de retardo, construídos de plástico, que têm a finalidade de fazer com que o impulso emitido não coincida com a origem da medição (superfície da peça). Os cristais são montados inclinados, com a finalidade de focalizar o feixe sônico permitindo a detecção de defeitos muito pequenos. Os cabeçotes SE são normalmente empregados para medição de espessuras e detecção de defeitos próximos à superfície. A figura 2.17 mostra detalhes de um cabeçote SE.

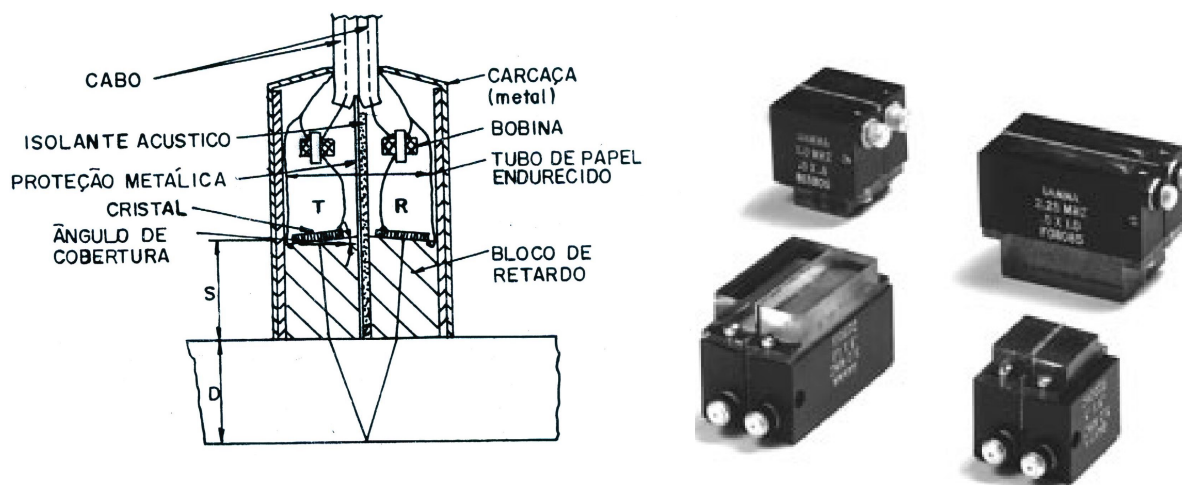


Figura 2.17: Cabeçote tipo SE (Krautkramer, 2003).

2.9 Geometria do Feixe Sônico

A forma geométrica do feixe sônico é muito importante quando se quer analisar a sensibilidade do cabeçote; se o feixe sônico for focalizado (ângulo de abertura pequeno) varrerá

uma pequena parte da peça com uma pressão sônica grande, por outro lado, se for disperso (ângulo de abertura grande) varrerá uma grande parte da peça com uma pressão sônica pequena. Dois aspectos devem ser analisados no estudo da geometria do feixe sônico:

Perfil da pressão axial- O ponto de máxima pressão na geometria do feixe sônico é função da coordenada axial com origem na linha de centro do cabeçote. O máximo valor da pressão é extraído dos picos de formato característico em função da amplitude e do tempo.

Orientação polar do feixe sônico- Quando examina-se o feixe sônico, desde a coordenada do ponto central até um ângulo de abertura θ arbitrário, a pressão máxima ocorre quando o ângulo é medido ao longo da coordenada radial. Esta forma de apresentação geralmente produz lóbulos laterais de energia de pressão, que ocorrem naturalmente devido ao fenômeno da interferência construtiva e destrutiva que acontece no processo de superposição durante a formação das ondas. A figura 2.18 mostra a orientação polar de um feixe sônico.

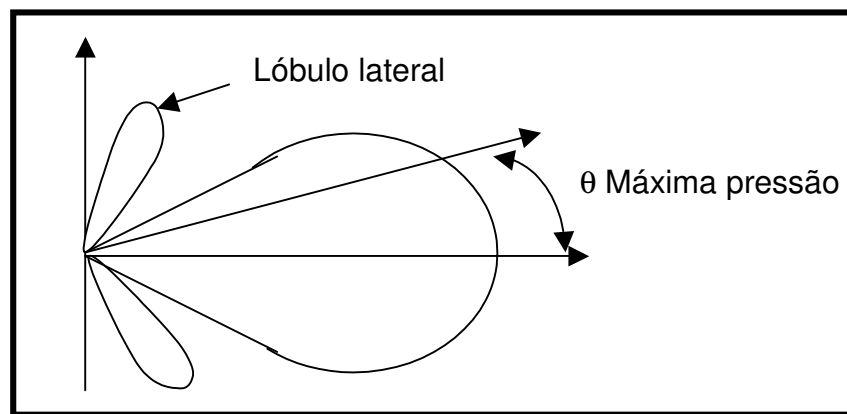


Figura 2.18: Orientação polar do feixe sônico com lóbulos laterais

Campo próximo - Para operações com ondas contínuas existe uma zona perto do cristal que é caracterizada como um campo de alta intensidade de energia, chamado de *campo próximo* (N). O ponto de pressão máxima do feixe sônico determina o final do campo próximo, conforme apresenta a figura 2.19:

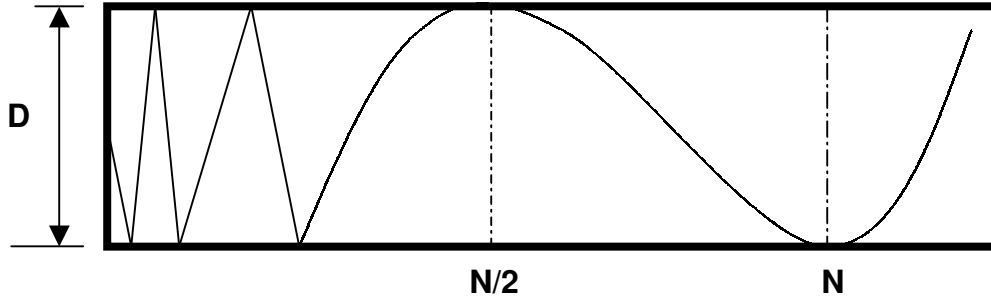


Figura 2.19: Campo próximo para cabeçote circular

O cálculo do comprimento do campo próximo é dado pelas expressões 2.15 para cabeçotes circulares e 2.16 para o caso de cabeçotes retangulares (Rodrigues et al., 2000).

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.15)$$

$$N = \frac{1}{\pi\lambda} (a^2 + b^2) \left(1 - \frac{a}{2b} \right) \quad (2.16)$$

Onde:

D – Diâmetro do cristal;

λ - Comprimento de onda;

a – Lado maior do cristal piezoelétrico do cabeçote retangular;

b – Lado menor do cristal piezoelétrico do cabeçote retangular.

O campo próximo é uma região de grande indefinição, pois acumula grande quantidade de energia em um espaço pequeno. As aplicações de ultra-som usando esta área são evitadas, e feitas depois do campo próximo, motivo da importância de conhecer a extensão desta área.

Campo remoto- Após o campo próximo, à medida que se afasta aparece o *campo remoto*, quando o feixe sônico se abre em forma de leque sob um ângulo θ , comportando-se como se fosse uma fonte puntual. A figura 2.20 mostra a forma do campo remoto.

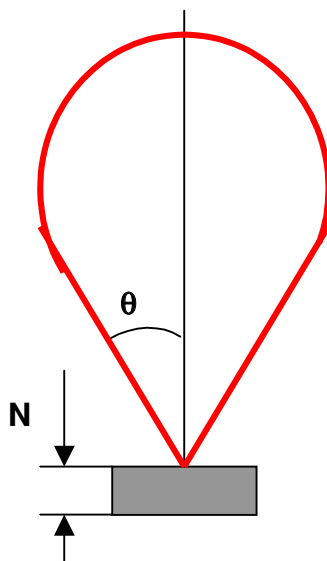


Figura 2.20: Campo remoto

O ângulo θ de abertura do feixe no campo remoto, pode ser calculado pela expressão 2.17, que relaciona o diâmetro ‘D’ do cristal com o comprimento de onda λ .

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad 2.17$$

2.10 Tensões Residuais

Tensões residuais ou internas consistem em um sistema de tensões que existem em um corpo quando este está livre de esforços externos. Estas tensões são oriundas de uma deformação plástica não uniforme no corpo, principalmente devido a mudanças não uniformes de forma e volume.

As tensões residuais precisam estar em equilíbrio estático, isto é, a força total e o momento agindo em qualquer plano do corpo, precisam ser iguais a zero. Para uma análise completa das tensões residuais agindo através da espessura de uma chapa, o estado das tensões residuais em qualquer ponto deve ser considerado, sendo que o estado de tensão residual em cada

ponto é a combinação das tensões residuais nas três direções principais. Frequentemente, por causa da simetria, a tensão residual é avaliada em apenas uma direção.

As tensões residuais são consideradas apenas como tensões elásticas; o valor máximo não pode ultrapassar o limite elástico do material. A tensão que excede este valor, sem a ação de forças externas, será relaxada por uma deformação plástica até atingir o valor da tensão de escoamento, condição necessária para estabelecer o equilíbrio interno. As tensões residuais aparecem nos processos mecânicos, térmicos e químicos, que produzem deformações permanentes e não uniformes na forma ou no volume das peças.

Nos trabalhos de materiais a quente, como a laminação, as tensões residuais são desenvolvidas pela não uniformidade do escoamento plástico. As fibras da superfície são trabalhadas a quente e tendem a alongar-se, enquanto as do centro permanecem inalteradas. A superfície e o centro do material tendem a estabelecer um estado de acomodação (equilíbrio). As fibras do centro tendem a conter o alongamento das fibras da superfície, e as da superfície procuram esticar as fibras do centro do material. O resultado é o aparecimento de tensões internas no material: uma alta tensão de compressão na superfície e uma tensão de tração no centro, conforme a figura 2.21. Em geral, o sinal da tensão residual, que é produzida por uma deformação não homogênea, será oposto ao sinal da deformação plástica que produziu a tensão residual.

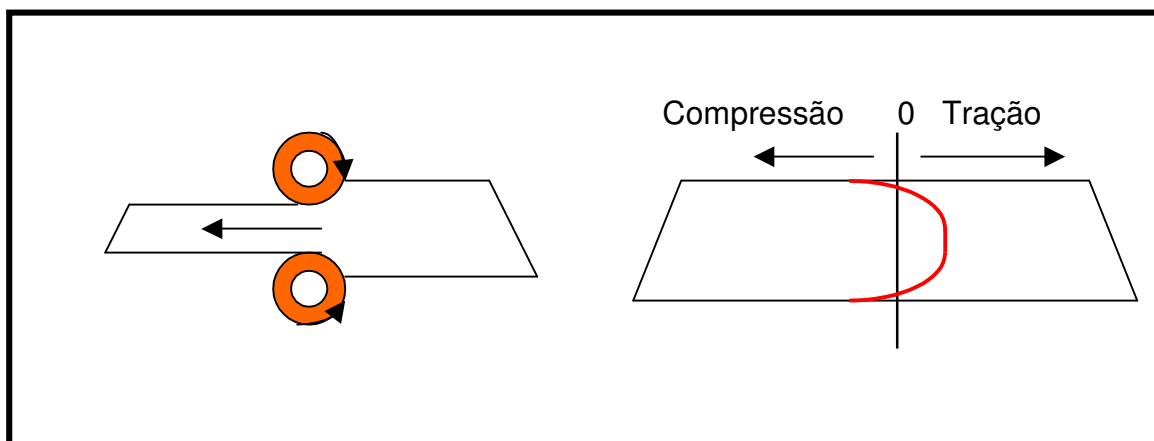


Figura 2.21: Deformação e tensão residual na laminação.

As tensões residuais devidas a processos térmicos, tal como tratamento térmico, podem ser classificadas como oriundas apenas de gradiente térmico, ou de gradiente térmico juntamente com uma transformação de fase. Estas situações aparecem com frequência na têmpera, fundição e soldagem.

Uma situação de grande interesse prático envolve tensão residual desenvolvida durante o processo de têmpera do aço para endurecimento. Neste caso, a tensão residual é devida a mudanças de volume devido à temperatura, somado a mudanças de volume devido à transformação de austenita em martensita. A primeira situação, na qual a tensão residual é devida apenas a mudanças de volume devido à temperatura, ocorre quando a têmpera do material é feita a uma temperatura abaixo da zona crítica. A figura 2.22 mostra a distribuição das tensões residuais nas direções longitudinal, tangencial e radial, para os casos em que o material se contrai no resfriamento, e para o caso em que o material se expande segundo Dieter (1983).

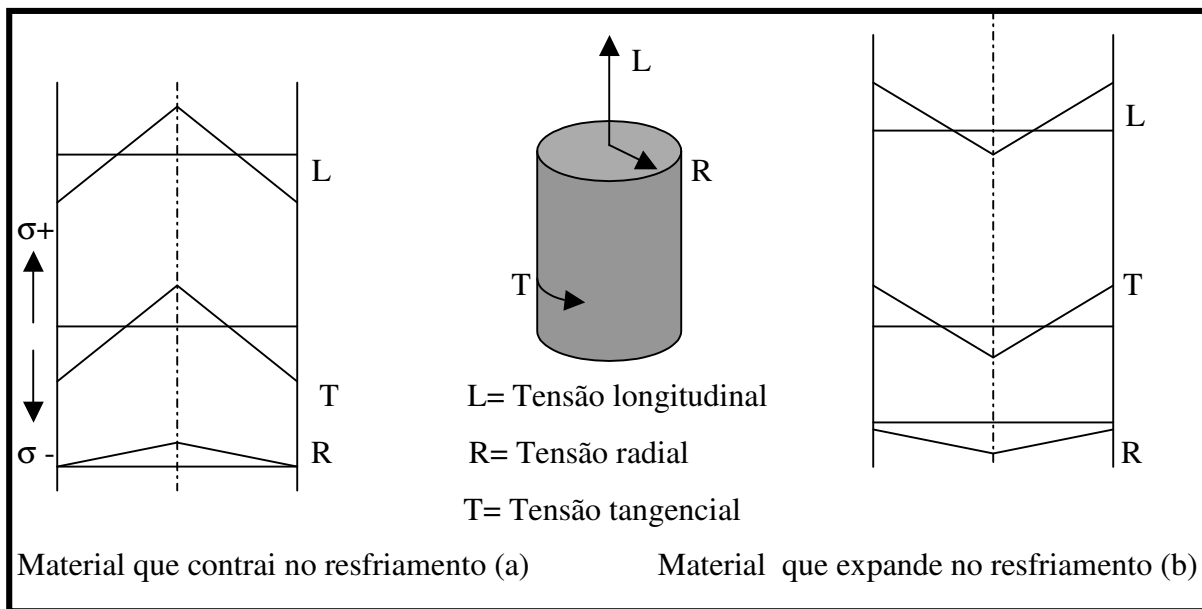


Figura 2.22: Tensões residuais em cilindro temperado devido à deformação térmica.

No caso ‘a’, o resfriamento relativo da superfície tende a provocar contração dentro do cilindro, que tem menor comprimento e diâmetro do que o original. Isto tende a expulsar calor do centro do cilindro que está mais comprido e fino do que o original. Se a parte interna do centro

estivesse livre para mudar de forma, independentemente da externa, a mudança seria para um cilindro de dimensão menor e mais fino no resfriamento. Porém, a continuidade deve ser mantida por toda barra, logo a parte externa estará em compressão (direções longitudinal e tangencial). Ao mesmo tempo, a parte interna é tracionada na mesma direção.

A magnitude da tensão residual produzida pela têmpera depende da relação entre tensão-deformação do material e o grau de deformação produzido pela têmpera, isto é, para uma dada deformação, o maior módulo de elasticidade do material corresponde à maior tensão residual. A tensão residual não pode exceder a tensão de escoamento; a maior tensão de escoamento corresponde à maior tensão residual possível. A curva que relaciona tensão de escoamento e temperatura do material, também é muito importante. Se a tensão de escoamento diminui rapidamente com o aumento da temperatura, a deformação será menor a altas temperaturas, pelo fato do material se acomodar termicamente produzindo mudanças de volume por escoamento plástico.

Na têmpera de aços em que a austenita se transforma em martensita, a distribuição da tensão residual em uma barra de aço é resultante do processo de contração térmica versus a expansão do volume na formação da martensita. A transformação de bainita ou perlita também produz aumento de volume, porém tal fato não é significativo. O resultado da tensão depende das características de transformação do aço, comandadas pela composição química e temperabilidade, além das características de transferência de calor do sistema, como as determinadas pelo tamanho da peça, temperatura de austenitização e a severidade da têmpera.

A distribuição de tensão residual neste caso é a mesma da figura 2.22, onde o caso “b” representa o resultado de uma transformação isotérmica pela decomposição da austenita. A taxa de resfriamento na têmpera é rápida o suficiente para converter todo material da barra em martensita. No mesmo tempo, o centro da barra atinge a temperatura de transformação da martensita, embora ela tenha sido essencialmente completada na superfície. As camadas da superfície tentam se contrair contra a expansão da parte central, sendo o resultado uma tensão residual de tração na superfície e de compressão no centro da barra. Se a taxa de resfriamento da têmpera for pequena, a distribuição das tensões residuais será igual ao caso “a” da figura 2.22,

onde a parte externa se transforma em martensita e a interna em perlita. Existe uma pequena resistência oferecida pelo calor que implica em um núcleo dúctil, enquanto a martensita é formada na superfície, pois o núcleo acomoda-se rapidamente com a expansão das camadas externas. O meio e o centro com perlita se contraem no resfriamento, produzindo tensões residuais de compressão na superfície e de tração no centro.

Algumas combinações de propriedades físicas provocam altas tensões no processo de têmpera:

- Baixa condução térmica (k);
- Alto calor específico (c);
- Alto coeficiente de expansão térmica (α);
- Alta densidade (ρ).

Estes fatores podem ser combinados para definir a difusão térmica (D_t) dada pela expressão 2.18, na qual baixos valores da difusão térmica causam altas tensões.

$$D_t = \frac{k}{\rho c} \quad (2.18)$$

Outros fatores, ligados ao aumento da diferença de temperatura entre a superfície e o centro da peça, podem provocar um aumento na tensão gerada pela têmpera, tais como:

- Peças de grandes diâmetros;
- Grande diferença entre a temperatura inicial e a temperatura do banho da têmpera;
- Têmpera severa (alta taxa de transmissão de calor).

A tensão residual na fundição é mais difícil de ser avaliada, pois o molde oferece resistência mecânica na solidificação, com diferentes taxas de resfriamento nos diversos pontos da peça.

Os processos químicos, tais como a oxidação, corrosão e eletrodeposição, podem gerar grandes tensões residuais na superfície do material devido à difusão atômica que causa um aumento de volume.

Para remover ou reduzir as tensões residuais é feito o alívio de tensões, que compreende um aquecimento ou trabalho mecânico no material. As tensões residuais desaparecem lentamente em temperatura ambiente, porém o processo é bastante acelerado pelo aquecimento do material a altas temperaturas. Apenas a tensão residual em excesso poderá ser eliminada imediatamente pelo escoamento plástico. No processo de alívio de tensões deve existir uma combinação entre tempo e temperatura, de modo que sejam suficientes para aliviar as tensões e, ao mesmo tempo, fortalecer os efeitos do trabalho a quente.

2.11 Aplicação das Ondas L_{cr} para Medição de Tensões

O conhecimento do estado de tensões de rodas ferroviárias em campo é extremamente importante para uma manutenção eficiente das composições, pois o aparecimento de tensões de tração no aro das rodas, indica uma necessidade premente de sua substituição. Na fabricação das rodas, a análise de tensões por ultra-som permite ao fabricante verificar a qualidade do produto quanto à segurança e a eficiência do tratamento térmico (conforme a nova Norma Européia EN13262 -anexo D), visto que, as tensões de compressão presentes no aro das rodas novas tem sua origem neste processo.

Muitos pesquisadores desenvolveram fórmulas para analisar a velocidade das ondas na presença de tensões. Os precursores foram Hughes e Kelly (1951), cujas fórmulas foram concebidas para velocidade de ondas em meio isotrópico, para um estado de tensões uniaxial ou hidrostático.

As ondas elásticas se propagam em sólidos isotrópicos com uma velocidade característica do material em teste. As velocidades das ondas longitudinais (V_l) e transversal (V_t) são dadas pelas expressões 2.19 e 2.20:

$$\rho V_l^2 = \lambda + 2\mu = K + \frac{3}{4}\mu \quad (2.19)$$

$$\rho V_t^2 = \mu \quad (2.20)$$

Onde:

ρ - Densidade do material;

λ e μ - Constante de Lamé;

K – Módulo de volume.

O comportamento elástico do material no sólido é descrito por λ e μ , numa primeira aproximação (Lei de Hooke). Em engenharia, as propriedades elásticas são mais frequentemente caracterizadas pelo módulo de Young (E) e o módulo transversal (G). As relações entre essas propriedades e as constantes de Lamé são:

$$G = \mu \quad (2.21)$$

$$E = \mu \left(\frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \right) \quad (2.22)$$

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \quad (2.23)$$

Ondas longitudinais e transversais se propagam no volume dos materiais. Mudando o ângulo de incidência, o feixe sônico pode retornar à face da peça como uma onda sub-superficial perto da superfície. A velocidade da onda superficial, propagando próxima à camada superficial, é dada pela expressão 2.19, e a velocidade de dispersão de uma onda livre (VSH) dada pela expressão 2.20. A onda superficial (V_R) é uma onda guiada, e segue a forma da superfície da peça, dada pela expressão 2.24:

$$V_R = V_t \frac{(0,87 + 1,12v)}{(1 + v)} \quad (2.24)$$

Onde:

v- Coeficiente de Poisson do material.

O modelo mais usado para descrição do efeito acustoelástico mostra a influência do estado de tensões na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas dadas por Hughes e Kelly, usando a teoria das deformações finitas de Murnaghan's, e os termos de terceira ordem da energia elástica de um sólido. A energia de deformação por unidade de volume $\phi(\epsilon)$, pode ser escrita como uma série de potências em função da deformação elástica ϵ , conforme a expressão 2.25.

$$\phi(\epsilon) = \phi_0 + gC_{ij}\epsilon_{ij} + \frac{1}{2}C_{ijkl}\epsilon_{ij}\epsilon_{kl} + \frac{1}{6}C_{ijklmn}\epsilon_{ij}\epsilon_{kl}\epsilon_{mn} + \dots \quad (2.25)$$

Se a tensão é zero antes da deformação, ϕ_0 é zero. O segundo termo é a energia potencial, que pode ser igual a zero desde que o nível de referência não seja importante. C_{ijkl} e C_{ijklmn} são os tensores de segunda e terceira ordens das constantes elásticas do sólido. O número de constantes elásticas é reduzido no caso de sólidos isotrópicos para duas constantes de segunda ordem (λ e μ) e três constantes de terceira ordem (l , m e n). As constantes elásticas são conhecidas pelas suas posições em termos de deformação na expressão 2.25. Os coeficientes dos termos com deformação elevada ao quadrado são constantes de segunda ordem, e as deformações elevadas ao cubo são constantes de terceira ordem. No sólido isotrópico, a densidade da energia de deformação depende apenas dos invariantes I_1 , I_2 e I_3 , do tensor de deformação (Lagrangian), desde que as constantes elásticas sejam invariantes (material isotrópico) sob rotações arbitrárias. Assim, a nova expressão da energia de deformação é dada pela equação 2.26.

$$\phi(\epsilon) = \frac{(\lambda + \mu)I_1^2}{2 - 2\mu I_2} + \frac{(l + 2m)I_1^3}{3 - 2m I_1 I_2} + n I_3 \quad (2.26)$$

A densidade de um corpo em tensão de deformação, também pode ser expressa em função dos invariantes, como mostra a expressão 2.27:

$$\rho(\epsilon) = \frac{\rho}{(1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3)} \quad (2.27)$$

Onde:

ρ - Densidade do sólido com tensão zero.

No caso de propagação de onda plana no eixo das deformações principais, existem apenas três componentes da deformação a serem considerados, ϵ_{ii} , $\epsilon_{ij}=\epsilon_{ji}$, $\epsilon_{ik}=\epsilon_{ki}$. Logo, os invariantes da deformação serão:

$$I_1 = \epsilon_{ii} \quad (2.28)$$

$$I_2 = -(\epsilon_{ij}\epsilon_{ji} + \epsilon_{ik}\epsilon_{ki}) \quad (2.29)$$

$$I_3 = 0 \quad (2.30)$$

Derivando a equação 2.26 em relação às deformações dos componentes da tensão, a solução das equações de onda resulta em três expressões para propagação de uma onda longitudinal pura e duas ondas transversais puras, polarizadas na direção principal da deformação de cada uma delas, conforme as equações:

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\epsilon_1 \quad (2.31)$$

$$\rho V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) + 4\mu\epsilon_1 + 2\mu\epsilon_2 - \frac{1}{2}n\epsilon_3 \quad (2.32)$$

$$\rho V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_3 - \frac{1}{2}n\varepsilon_2 \quad (2.33)$$

O primeiro índice da velocidade “V” representa a direção de propagação do som; o segundo, a direção da vibração; e os índices 1, 2 e 3 são os eixos cartesianos. V_{11} é a velocidade de propagação da onda longitudinal na direção 1, V_{12} e V_{13} são velocidades de duas ondas transversais polarizadas ao longo dos eixos principais, conforme mostra a figura 2.23 (Schneider, 1997):

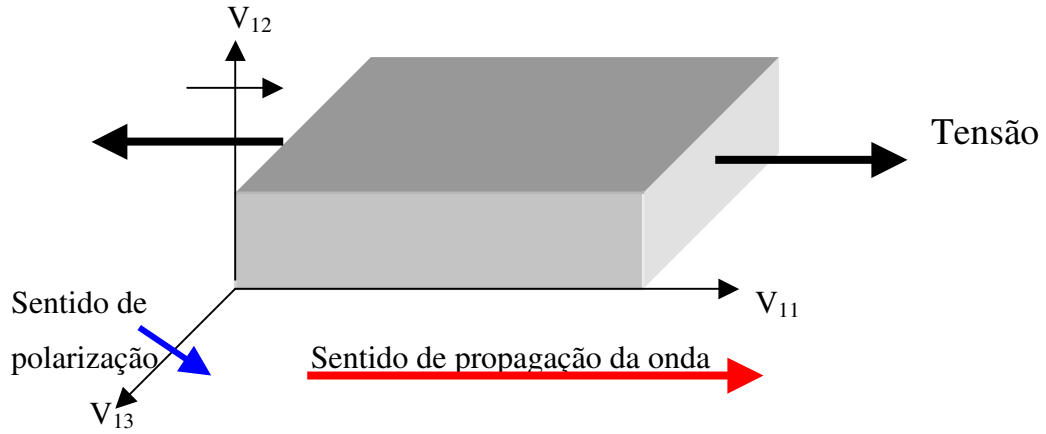


Figura 2.23: Sistema de coordenadas de um campo de tensão.

As equações 2.31, 2.32 e 2.33 podem ser simplificadas, considerando que a deformação está agindo apenas na direção 1 (estado uniaxial). Portanto, as seguintes considerações podem ser feitas com relação às deformações:

:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon \quad (2.35)$$

As novas equações ficam:

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + v\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (2.36)$$

$$\rho V_{12}^2 = \rho V_{13}^2 = \mu + \left[4\mu + v \left(\frac{n}{2} \right) + m(1 - 2v) \right] \varepsilon \quad (2.37)$$

A sensibilidade da equação 2.36 em relação à deformação, pode ser obtida derivando-a em relação à deformação ε , conforme a equação 2.38, e reagrupando os termos. Nesta equação o termo L_{11} é definido como constante acustoelástica para as ondas longitudinais, e se aplica às ondas L_{cr} .

$$\frac{dV_{11}/V_{11}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{(\mu + 2m) + v\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (2.38)$$

Os valores das constantes acustoelásticas nas outras direções são obtidas da mesma forma. A variação da velocidade V_{11} , controlada pela constante L_{11} , é muito maior do que as outras nas demais direções, indicando que as ondas que se propagam no mesma direção da aplicação das tensões são as mais indicadas para avaliação das tensões (mais sensíveis às variações das tensões).

A tensão pode ser calculada por uma aplicação unidimensional de tensão-deformação em sólidos elásticos. A equação 2.38 pode ser re-arranjada de modo a fornecer a variação da tensão em função do tempo relativo de percurso da onda (dt/t_0), como mostrado na equação 2.40, onde t_0 é o tempo de percurso da onda para um material livre de tensões (tensão zero), com as mesmas características do material a ser investigado. A equação 2.39, da resistência dos materiais, é utilizada para transformar a deformação em tensão, que é incluída na equação 2.40:

$$d\sigma = E d\varepsilon \quad (2.39)$$

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (2.40)$$

Onde:

$d\sigma$ - Variação da tensão (MPa);

E – Módulo de elasticidade (MPa).

A equação (2.40) pode ser aplicada em outras direções, desde que a constante acustoelástica “ L ” seja mudada para um valor referente à nova direção.

Para medição de tensão, os cabeçotes das ondas L_{cr} devem ser montados com distância fixa e conhecida, com um cabeçote agindo com emissor e outro como receptor. Em alguns casos são usados dois cabeçotes para recepção, particularmente para avaliar o efeito da temperatura. Os efeitos da tensão, da textura e da temperatura na velocidade da onda influenciam os dados coletados. A forma de influência destes parâmetros é dada pela equação 2.41:

$$t = t_0 + \Delta t_{RS} + \Delta t_T + \Delta t_F + \Delta t_{TX} \quad (2.41)$$

Onde:

t - Tempo de percurso da onda;

t_0 - Tempo de percurso da onda na temperatura padrão no material homogêneo, isotrópico e livre de tensões;

Δt_{RS} – Efeito da tensão residual no tempo de percurso da onda;

Δt_T – Efeito da diferença de temperatura em relação à temperatura padrão medida;

Δt_F – Efeito da força aplicada no tempo de percurso da onda;

Δt_{TX} – Efeito da textura do material no tempo de percurso da onda.

2.12 Influência da Mudança de Microestrutura na Variação da Velocidade das Ondas Ultra-Sônicas e no Efeito Acustoelástico.

Os cristais dos metais são anisotrópicos. O ferro alfa, por exemplo, tem o módulo de elasticidade variando com a direção cristalográfica, o que influencia a velocidade da onda em diferentes direções. Nas direções $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ do cristal cúbico de ferro, as velocidades das ondas ultra-sônicas longitudinais são 5440, 6190 e 6420 m/s, respectivamente, mostrando uma variação superior a 15%. Os materiais policristalinos são, de modo geral, heterogêneos, devido às diferentes orientações dos cristais; logo, as constantes elásticas variam em relação ao sistema de referência.

O estado da microestrutura determina o comportamento elástico do material e também o da velocidade da onda ultra-sônica. Técnicas de ultra-som para avaliação de tamanho de grão, porosidades e danos por fadiga são desenvolvidas para casos de aplicação específica. Devido à complexidade da interação entre elementos microestruturais, como grãos, contorno de grãos, precipitações, poros, deslocamentos, vazios com a propagação de ondas ultra-sônicas, e pelo fato destas influências na velocidade do som serem da mesma ordem de grandeza da influência da deformação ou da tensão, não existe uma aproximação generalizada que possa ser usada para avaliação do estado de tensão em materiais nos quais a microestrutura varia na área ensaiada. O único procedimento existente é a investigação experimental da dependência entre as velocidades do ultra-som e de suas respectivas tensões, usando amostras representativas com diferentes estados de microestrutura (Schneider, 1998).

2.13 Birrefringência

A birrefringência acústica foi descoberta por Benson e Raelson, em 1959, sendo que, em 1967, Crecraft utilizou o fenômeno para medição de tensão residual. A birrefringência é definida como sendo a diferença de velocidade entre duas ondas cisalhantes polarizadas ortogonalmente, se propagando ao longo do material. A equação 2.42 define a birrefringência:

$$B = 2 \frac{(V_{\theta} - V_r)}{(V_{\theta} + V_r)} = 2 \frac{(t_r - t_{\theta})}{(t_{\theta} + t_r)} \quad (2.42)$$

Onde:

V_{θ} e V_r – Velocidades das ondas nas direções circunferencial e radial.

t_r e t_{θ} – Tempos de percurso das ondas nas direções circunferencial e radial.

Nas rodas ferroviárias, devido ao gradiente térmico no resfriamento após o tratamento térmico, é razoável esperar que no aro, nas direções radial e circunferencial (seguindo a curvatura da pista de rolamento da roda), existam eixos de simetria. Se não existe tensão de cisalhamento presente no aro da roda, então σ_{θ} e σ_r são as tensões principais. A equação 2.43 mostra as tensões principais nas rodas ferroviárias em função das tensões, onde σ_{θ} é a tensão na direção circunferencial no aro da roda e σ_r é a tensão na direção radial; e C_A é a constante acustoelástica do aço para ondas transversais, que depende do tipo de material para uma dada força aplicada na peça (Schramm et al., 1995).

$$B = B_0 + C_A (\sigma_{\theta} - \sigma_r) \quad (2.43)$$

A figura 2.24 mostra as direções radial e circunferencial de polarização das ondas nas rodas ferroviárias para determinação da birrefringência e tensão.

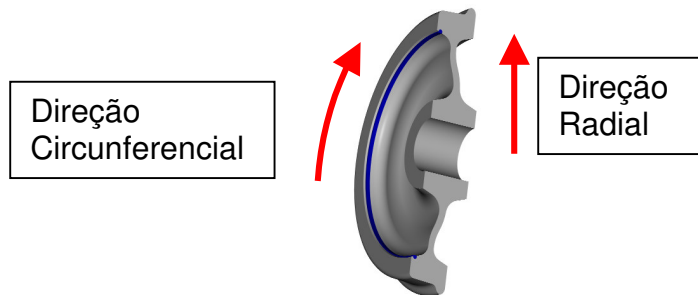


Figura 2.24: Direções de polarização das ondas para determinar a birrefringência.

2.14 Revisão Bibliográfica

O emprego de ondas sônicas, para detecção de discontinuidades em peças forjadas ou fundidas, iniciou-se há mais de uma centena de anos com o “teste do tinido”, que consistia em bater com martelo na peça a ser analisada e comparar o ruído com uma peça boa (sem defeitos). A técnica de utilização do ultra-som foi empregada primeiro na Rússia, em 1929, por Sokolov, e na Alemanha, por Mulhauser. Em 1942, Firestone construiu o primeiro sonar, utilizando o princípio de “trens de onda”, com a fabricação de transdutores para detectar submarinos. Em 1945, a técnica começou a ser usada em ensaios não destrutivos para detectar defeitos internos em materiais (Rodrigues e Mineiro, 2000).

O desenvolvimento de técnicas de ultra-som para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais começou em 1950, com a medição da velocidade das ondas para avaliar as constantes elásticas dos materiais com a variação da temperatura. Em 1953, Hughes e Kelly desenvolveram a teoria acustoelástica baseada na teoria da elasticidade não linear de Murnaghan, que consistia na avaliação da mudança das velocidades das ondas de ultra-som em função das deformações elásticas (tensão) de um sólido isotrópico. O fenômeno da birrefringência foi descoberto por Bergman, Shahbender, Benson e Raelson, em 1958; os autores observaram a variação da velocidade da onda transversal quando o sentido de vibração coincidia com o da aplicação da tensão, e quando lhe era perpendicular. Crecraft, em 1967, mostrou que o ultra-som poderia ser usado para análise de tensão em componentes de engenharia.

No Brasil, a técnica do ultra-som começou a ser estudada no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Na década de 70 o ultra-som começou a ser incorporado nas empresas brasileiras como parte do processo de inspeção com o objetivo principal de localizar defeitos internos. Na década de 90, surgiram no Brasil as aplicações mais avançadas da técnica, como para medir vazão de água em reatores nucleares, estudo de porosidade em cerâmica, medição de tensões em barras metálicas e aro de rodas ferroviárias, determinação da direção de laminação em chapas metálicas e tamanho de grão de materiais metálicos usando o coeficiente de atenuação obtido por ultra-som (Bittencourt et al., et al, 1999).

Hauk et al., em 1997, descreveram a teoria envolvida na análise de tensões por ultra-som, bem como a propagação de ondas em materiais isotrópicos segundo suas características. As ondas longitudinais se propagam no volume da peça, conforme a variação do ângulo de incidência. As ondas que ficam mais perto da superfície são chamadas de ondas superficiais. Um dos tipos de ondas superficiais é a onda de Rayleigh.

Os ensaios de ultra-som são mais utilizados para detecção de defeitos internos em peças metálicas e não metálicas. Os processos mais usados são: impulso eco, transparência, imersão, ressonância e reflexão. Os aparelhos de ultra-som são calibrados antes de cada ensaio por um padrão com as mesmas características da peça a ser ensaiada (Rodrigues et al., 2000).

As constantes acustoelástica e de terceira ordem foram medidas, em 1976, em aços de trilhos ferroviários por Egle e Bray. Foram induzidas diferentes tensões e analisadas as mudanças das velocidades das ondas em cinco diferentes posições para o estado uniaxial de tensões. Foram usadas ondas longitudinais e transversais propagando-se na direção paralela e perpendicular ao eixo do carregamento. Os corpos-de-prova foram carregados em tensão e em compressão em uma máquina de teste convencional. Os testes mostraram que a velocidade da onda longitudinal propagada na direção do carregamento (V11) era fortemente influenciada pela tensão, enquanto que ondas transversais ou de cisalhamento propagando ao longo da direção da espessura diminuíam significativamente se a vibração fosse paralela ao eixo de carga (V31), e aumentavam levemente se fosse perpendicular à direção do carregamento (V32). A comparação entre V31 e V32 mostrava que para ondas transversais a variação da velocidade era maior se a direção de polarização fosse ao longo do eixo de carregamento conforme a figura 2.25.

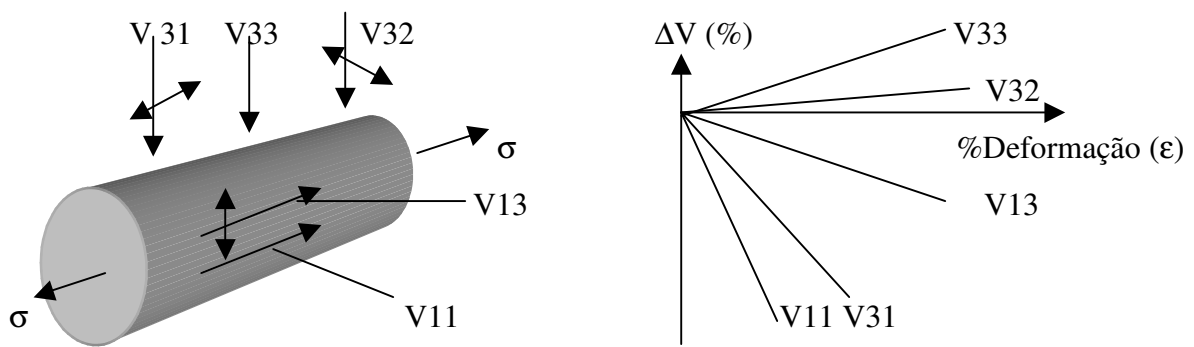


Figura 2.25: Variação da velocidade da onda em função da direção da tensão.

Conforme mostrado pelo trabalho dos autores retrocitados, foi comprovado que a velocidade da onda mudava linearmente com a deformação (tensão). A diferença entre as velocidades das ondas em tração e em compressão ficou dentro de uma faixa de erro experimental aceitável e não sendo significativa (Egle e Bray, 1976).

Egle e Bray (1979) estudaram a mudança do estado de tensão relacionado com a temperatura nos trilhos ferroviários, usando ultra-som. Os autores apresentaram resultados da medição de tensão usando ondas longitudinais. As tensões nos trilhos eram causadas por mudanças na temperatura ambiente e pelo tráfego. Nas antigas fixações de trilhos por talas e parafusos, existia espaço para dilatação térmica; as junções soldadas eliminaram este grau de liberdade fazendo com que os trilhos se deformassem lateral e verticalmente, resultando na geração de tensões longitudinais. O melhor lugar para estas medições foi o meio da alma do trilho, perto da linha neutra. O efeito da mudança da velocidade da onda longitudinal com a tensão foi notado na direção da aplicação da tensão. A avaliação da repetibilidade da medição dos transdutores ocorreu em três etapas. A primeira foi feita em laboratório com corpos-de-prova usinados da cabeça do trilho para verificar o efeito de fatores não relacionados com as condições da superfície e curvatura; na segunda foi avaliada a repetibilidade das medições em uma superfície de trilho típica e na terceira foi medido o tempo de percurso da onda em oito diferentes trilhos por um período longo.

Um dos problemas associados ao uso da técnica acustoelástica para medição de tensão de materiais em repouso é que a velocidade das ondas tem uma variação muito pequena. As ondas longitudinais são mais sensíveis às mudanças de tensão. O tempo de percurso destas ondas é considerada como referência para um material livre de tensões. Quatro estações foram instrumentadas para fornecer a tensão longitudinal no eixo neutro em cada lado do trilho, a tensão vertical na mesma localização e a tensão lateral no topo do trilho. As temperaturas do trilho também foram medidas com termopares. O trabalho concluiu que o ultra-som era um método capaz de medir tensões longitudinais em trilhos com sensibilidade de 1 ksi (Egle e Bray, 1979).

Estudos da anisotropia da camada termicamente afetada em trilhos ferroviários usados, foram desenvolvidos por Egle e Bray (1981). Uma camada de 3 mm a 5 mm situada na cabeça do

trilho era afetada termicamente pelo aquecimento devido à passagem dos trens. Nesta região, a velocidade da onda transversal era reduzida em torno de 10%. O principal motivo para isto era o material de textura diferente nesta região. Corpos-de-prova de trilhos novos e usados, com espessura de 4 mm, foram extraídos de diferentes posições com diferentes orientações relativas ao eixo longitudinal do trilho. As velocidades das ondas transversais observadas foram menores nesta região, indicando que existia uma textura diferente do aço nesta área. As ondas transversais, chamadas de “SV”, apresentaram velocidade acima de 3.300 m/s nos trilhos novos (duas amostras). Em seis amostras de trilhos usados esta velocidade média foi de 3.013 m/s e a mais alta foi de 3.240 m.s⁻¹. As oito amostras apresentaram uma velocidade uniforme das ondas transversais quando medidas no centro do trilho. Dois fenômenos poderiam explicar a mudança da velocidade da onda transversal: a tensão residual devido à área termicamente afetada e o desenvolvimento de uma textura diferente (com uma orientação preferencial) no metal trabalhado a quente. Diferentes texturas do material afetaram a propagação das ondas, porém nos trilhos a deformação ocorria apenas abaixo da superfície. As rodas passando pelo trilho desenvolviam um processo de laminação a quente. O estudo identificou como sendo a direção de rotação da roda (eixo longitudinal do trilho) a direção de laminação. As velocidades de propagação foram descritas como sendo uma longitudinal (v1) e duas transversais (v2 onda lenta e v3 onda rápida).

Sistemas precisos de medição de velocidades de ondas indicavam a existência de uma orientação preferencial das ondas em metais laminados. Em materiais sem laminação as duas ondas transversais tinham a mesma velocidade quando passavam através da espessura do material, enquanto que na peça laminada existia uma diferença entre v2 e v3, que era observada em certas direções de propagação. O topo do trilho foi considerado como plano de laminação e o eixo longitudinal como direção de laminação. O trabalho concluiu que existiram grandes mudanças nas velocidades das ondas em camadas de materiais trabalhados a quente (Egle e Bray, 1981).

Bray et al., (1985) apresentaram a técnica para medir tensões internas em trilhos soldados na condição de repouso (força zero) usando “head waves” (ondas refratadas no primeiro ângulo crítico), que se propagavam como ondas de volume, possuindo um comportamento mais adequado para medir tensões internas. Estas ondas não eram afetadas por irregularidades da

superfície, tais como corrosão, estrias e amassados comuns em peças forjadas. Os tempos de percurso das ondas foram coletados e calculados minimizando os efeitos da textura e da tensão residual. A técnica permitiu medir a tensão absoluta, muito importante para prevenir amassamento em trilhos soldados. As variações de tensão residual e textura nos trilhos foram computadas antes da aplicação de qualquer força na peça. A maior dificuldade encontrada foi separar os efeitos da textura do material, tensão aplicada e temperatura, dos valores para tensão do trilho com força zero (residual). Para separar estes efeitos, os dados coletados foram submetidos a dois tipos de tratamento: o estatístico (com resultados muito dispersos) e o empírico (com resultados consistentes). Ondas “head waves” mostraram -se apropriadas para medição de cargas longitudinais em aço e alumínio, bem como para transmitir pulsos para longas distâncias.

Fukuoka et al., (1985) avaliaram tensões residuais no aro de rodas ferroviárias monobloco, usando a teoria acustoelástica e efeito da birrefringência. Nesta avaliação, o efeito da anisotropia devido à textura da roda foi separado da anisotropia acústica. O espalhamento (espectro) da textura anisotrópica foi investigado usando sete rodas forjadas, sendo que em quatro foram feitos ensaios de frenagem para mudança do nível das tensões residuais. As tensões foram analisadas no estado inicial e após as frenagens pela acustoelasticidade usando transdutores de 5 MHz de ondas transversais, e os resultados comparados com métodos destrutivos tradicionais e pela análise de elementos finitos. A técnica da acustoelasticidade mostrou ser eficiente para avaliar tensões residuais no aro de rodas forjadas com textura anisotrópica; os resultados comparados com os métodos destrutivos tradicionais e elementos finitos mostraram um desvio de tensão 40 MPa. De acordo com os autores a acustoelasticidade não se mostrou eficiente para avaliação nas rodas fundidas por causa da grande anisotropia do material.

Schneider (1995), usou a birrefringência para caracterizar o estado de tensões volumétrico em componentes, para caracterizar a textura relacionada com as propriedades de partes laminadas de semi produtos. Tensão e textura causam uma anisotropia elástica no componente. A birrefringência de uma onda transversal linearmente polarizada, propagada ao longo da direção da espessura do componente, foi usada para determinar as direções dos dois eixos principais.

Tensões residuais no aro de rodas ferroviárias, bem como textura de folhas laminadas, foram medidas e determinadas usando a propriedade da birrefringência.

Schramm et al., (1995) publicaram uma pesquisa feita no ‘National Institute of Standards and Technology’ sobre medições de tensão por ultra-som usando ondas cisalhantes no aro de rodas fundidas. As tensões em 20 rodas foram medidas com transdutores magnéticos e piezoelétricos, sendo os resultados comparados entre si e comparados com o método destrutivo, cortando as rodas com serra e medindo o fechamento ou abertura do corte. As rodas foram colocadas em dinamômetro para simular as condições de frenagem provocando alterações no estado inicial de tensões da roda. Quatro rodas tiveram as sapatas de freio ajustadas para posição central da pista de rolamento e em dezesseis as sapatas foram ajustadas para posição da pista e friso das rodas. No dinamômetro, as rodas foram aquecidas pelo processo de frenagem com potências que variaram de 56 kW até 75 kW. Para eliminar a influência da textura do material nas rodas fundidas, em pequenos blocos de rodas foram feitos tratamentos para alívio de tensões. Desta forma a variação de medições feitas nestes blocos seriam apenas devido à textura, possibilitando ajustar a precisão do sistema. As tensões medidas com os dois sistemas mostraram que com 56 kW de aquecimento as tensões estavam similares às de rodas novas (tensão de compressão), porém com 75 kW foram observadas mudanças para tensão de tração. A influência da textura pode variar a tensão em até 50 MPa (variação alta). As tensões foram medidas na face interna e externa do aro das rodas e apresentaram um valor maior no lado interno. Para rodas novas, os valores das tensões nos dois lados foram muito próximos. A pesquisa concluiu que a medição de tensões por ultra-som pode fornecer uma indicação segura entre rodas com danos térmicos e inversão de tensões e rodas novas. Rodas com tensão de tração acima de 300 MPa podem falhar por trincamento, segundo os autores.

Em outra pesquisa.(Schramm et al., 1995) mostraram a medição de tensões em rodas ferroviárias fundidas, usando novamente o método do ultra-som com transdutores eletromagnéticos e piezoelétricos, e comparando os resultados com testes destrutivos por meio do corte das rodas. Neste trabalho, as rodas foram aquecidas por indução, ao contrário da pesquisa anterior na qual se utilizou a simulação de frenagem em dinamômetro para provocar o aquecimento das rodas para mudança do estado de tensão. Foram medidas as tensões residuais de

dez rodas fundidas da mesma corrida. Oito rodas foram aquecidas por indução para provocar a inversão de tensões no aro e duas não foram aquecidas (permaneceram com as tensões de compressão originais de fabricação). O aquecimento por indução gerou um estado de tensões ideal pela simetria ao longo do eixo, enquanto que a simulação de tensões pela frenagem gerou variação nas tensões ao longo da circunferência, pelo aquecimento localizado de alguns pontos. Foram feitas mais de 1000 medições com os dois tipos de transdutores na face interna e externa do aro das rodas. Os dois sistemas apresentaram resultados muito próximos, o que não aconteceu com a medida da birrefringência (B_0) (obtida de porções de aro de rodas cortadas e submetidas a tratamento de alívio de tensões), que apresentou uma dispersão da ordem de 50 MPa atribuída à variação da textura do fundido. As tensões medidas com os transdutores piezoelétricos e magnéticos apresentaram uma variação de 30 MPa, sendo este valor considerado baixo para a medição com os diferentes aparelhos. A tensão interna apresentou tendência de crescimento com o aumento da temperatura, mesmo comportamento da tensão superficial da face interna do aro, com uma variação de 180 MPa desde o estado de fabricação até o aquecimento de 45 kW. A face externa do aro apresentou uma variação de -65 MPa para a mesma condição, mostrando que existe um gradiente de tensão ao longo da espessura do aro das rodas. A ferrovia da Alemanha (Deutsches Bundesbahn) usa o sistema de ultra-som para medir as tensões internas das rodas, fazendo as medições no centro do aro para separar as rodas que apresentam tensão de tração, e que devem ser substituídas.

Santos Jr e Bray (1999), fizeram também a comparação dos sistemas usando transdutores piezoelétrico e magnético para medir tensões no aro de rodas ferroviárias. O estudo concluiu que os dois métodos podem ser usados embora ambos apresentem desvantagens. Os transdutores magnéticos formam ruído na captação do sinal e os piezoelétricos necessitam de acoplante e de superfície polida para que tenham um bom desempenho. O sistema magnético já é disponível comercialmente e o piezoelétrico está em fase de teste.

Ondas refratadas no primeiro ângulo crítico (Critically Refracted Longitudinal Waves – Lcr) foram pesquisadas por Salamanca et al.,(1989). Estas ondas são particularmente úteis para a medição de tensões residuais, pois são ondas sub-superficiais que se propagam de maneira linear desde a emissão até a recepção. Como a velocidade da onda Lcr é muito sensível à variação de

tensão, condições de tensão zero ou muito baixas podem ser identificadas com facilidade. A velocidade das ondas, segundo a teoria acustoelástica, muda com a aplicação das tensões de forma linear, mostrando quando o material encontra-se elasticamente deformado. Existem duas maneiras de medir a velocidade das ondas L_{cr} : a primeira, usando um transdutor para transmitir e outro para receber, e a outra, usando um para transmitir e dois para receber. Estas ondas foram aplicadas para medição de tensões em laboratório em chapas soldadas e, no campo em pás de turbina, com resultados satisfatórios (Salamanca et al., 1989).

As constantes elásticas de terceira ordem são muito importantes na teoria acustoelástica. O método de cálculo dessas constantes foi baseado na extensão da teoria linear elástica proposta por Lubarda (1997), para agregados isotrópicos e cristais cúbicos. As constantes calculadas foram comparadas com outros métodos analíticos disponíveis. O cálculo das constantes elásticas de terceira ordem, baseado no módulo de elasticidade e no comportamento elástico, levou a resultados diferentes, por causa das energias complementares não serem exatamente conhecidas e pela aproximação quadrática da deformação.

Egle e Bray (1976), confirmaram que a velocidade das ondas L_{cr} de ultra-som depende da magnitude e da direção das tensões que causam deformações no sólido, isto é, quanto maior é for tensão na peça menor será a velocidade da onda. A influência da tensão ou da deformação na velocidade das ondas transversais serão maior se a direção de polarização for efetuada ao longo de eixo de carga.

A textura do material depende da direção de laminação e do tratamento térmico ao qual ele foi submetido. A influência da textura na velocidade das ondas longitudinais não muda com a troca das direções de propagação e de vibração. A mudança de temperatura altera a densidade e as propriedades mecânicas do material. Devido à complexidade de interação entre os elementos microestruturais (tamanho de grão, contorno de grão, poros, vazios e precipitações), não existe um tratamento matemático generalizado (apenas experimental) que possa ser usado para avaliar as tensões em materiais com mudanças de microestrutura. A porcentagem de carbono tem grande influência no valor da constante acustoelástica, bem como na dureza do material. O estado de

tensões do material (simples, duplo ou triplo) e a microestrutura indicam o tipo de onda que deve ser usada.

Na análise de tensões por ultra-som assume-se que o eixo principal de deformação coincidia com o eixo principal de tensão. Para o estado uniaxial de tensões foram usadas ondas transversais propagando-se na mesma direção das tensões; e para o estado de tensões superficiais foram usadas ondas de Rayleigh, que tinham a vantagem de poderem ser geradas com transdutores eletromagnéticos. A desvantagem deste tipo de onda era sua sensibilidade a defeitos superficiais. No estado duplo de tensões, foram aplicadas duas ondas transversais propagando na espessura, com polarização paralela a cada um dos dois eixos principais de tensão, sendo a tensão final a diferença entre as duas. No estado triplo de tensões a onda foi polarizada ao longo de duas direções principais e o estado de tensão foi caracterizado pela diferença entre as duas tensões principais. Na solda, a tensão por ultra-som poderia ser medida se fosse conhecida a constante acustoelástica do material e da solda (Hauk et al., 1997).

A maioria das teorias acustoelásticas foi baseada no princípio que o corpo era um estado hiperelástico de tensão, o que acontecia com frequência, porém, não era válido para tensões induzidas por deformações plásticas localizadas, as quais mudavam os parâmetros do material. Além disso, muitos materiais exibiam leve anisotropia ou mudança de textura devido ao processo de fabricação, fatores que alteravam a velocidade da onda juntamente com a tensão, sendo difícil separar os efeitos causados por cada um deles. A variação da velocidade da onda era da ordem de 0,001% por MPa (muito pequena e sensível) no alumínio, fato que tornou a técnica acustoelástica limitada a material homogêneo e a regiões com uniformidade de microestrutura e de composição. Para contornar estes problemas, em 1994 surgiu uma nova técnica chamada de ‘Razão Acústica Generalizada’ (Generalized Acoustic Ratio-GAR), que era baseada na medição do tempo de viagem da onda de ultra-som em dois modos (longitudinal e cisalhamento,) perpendicular ao plano da tensão e associado ao ângulo de polarização das ondas. O método apresentava muitas vantagens, pois era baseado na razão da velocidade das ondas, sendo que as ondas viajavam ao longo de caminhos idênticos dispensando a medição do comprimento do caminho percorrido pela onda. A técnica permitiu a medição das tensões em duas direções (Dorfi et al., 1996).

A avaliação das tensões por ultra-som, em rodas ferroviárias, pode ser feita pelo sistema ECOMAT (aparelho que mede tensões usando ultra-som gerado por transdutor eletromagnético), conforme (Gori et al., 1998). A medição da tensão residual no aro de rodas ferroviárias usou o efeito acustoelástico medindo a birrefringência de duas ondas cisalhantes produzidas por um transdutor EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer). Os dados da birrefringência foram comparados com os resultados de medição com strain gages, pelo método destrutivo. Foi observado que os resultados dos dois métodos diferiam em menos de 20 MPa, validando o sistema para uso na fábrica de rodas ferroviárias forjadas da Lucchini (Itália). A validação foi feita em rodas novas, que após serem avaliadas com o ECOMAT, foram cortadas em 3 partes, para medição da tensão com strain gages, colados no meio da face do aro e da pista de rolamento. As medições concluíram que o valor da birrefringência estava associado à textura da roda. A medição de tensão também pôde ser feita com transdutores piezoelétricos que produziam sinais mais fortes, porém eram mais sensíveis às variações de espessura e à temperatura do acoplante.

O estado de tensões nas rodas ferroviárias é fortemente influenciado pelo processo de aquecimento e resfriamento do aro durante e depois do uso das sapatas de freio. (Gallager et al., 1992), estudaram a influência da temperatura gerada no processo de frenagem, na inversão de tensões em rodas ferroviárias fundidas na Griffin Company (Estados Unidos). O tratamento térmico das rodas ferroviárias, durante o processo de fabricação, garantiu uma tensão residual de compressão no aro. Na medida que estas rodas foram solicitadas pelo processo de frenagem, as tensões de compressão se transformaram em tração levando a roda à trinca. As rodas com trincas térmicas mostraram a presença de perlita esferoidizada, que ocorre à temperatura de 537 °C, por um tempo maior que 30 minutos. Para entender o processo de inversão de tensões, as rodas foram aquecidas por indução, com bobina, para simular a ação da sapata de freio. Os resultados foram comparados com rodas novas, sem aquecimento. As rodas foram aquecidas com 30, 60 e 90 minutos. Os resultados mostraram que nas rodas com 30 minutos a inversão de tensões ocorreu com uma potência de frenagem de 76 HP; para a de 60 minutos ocorreu a uma potência de 45 HP e para 90 minutos a uma potência de 39 HP. Os testes mostraram a influência da temperatura de frenagem na inversão de tensões.

Schneider (1998) (b) aplicou a técnica de medição das tensões por ultra-som em rodas ferroviárias avaliando o tempo de deslocamento de uma onda cisalhante polarizada ao longo das direções radial e circunferencial, pelo cálculo da diferença entre as tensões principais nas duas direções. O processo admitiu que a única razão para mudança do tempo de deslocamento da onda nas duas direções era o estado de tensões (Egle e Bray, 1976). A distribuição das tensões ao longo do aro da roda era em forma de arcos, sendo mais intensa na superfície do aro externo e na pista de rolamento. O perfil das tensões no aro dependia das condições de frenagem. Tensões altas perto da superfície de rolamento ocorreram quando a frenagem era forte e rápida, e no meio do aro quando eram fortes e longas. A textura do material (tamanho de grão) apresentou forte influência neste processo, pois alterou o tempo de percurso da onda. As texturas mais grosseiras e não homogêneas causaram grande atenuação do som. As texturas mais favoráveis foram as finas e homogêneas, embora rodas com textura grosseira tenham mostrado bons resultados, desde que a textura fosse homogênea ao longo da circunferência da roda. (Schneider, 1998).

As aplicações das técnicas não destrutivas de ultra-som (eletromagnética e magneto elástica), desenvolvidas no final da década de 70 e início de 80, para avaliação de tensões em peças, tiveram seus resultados comparado com os obtidos com a difração de raios X e strain gages, por Schneider (1998) (a). Segundo seu estudo, as aplicações das técnicas de ondas eletromagnéticas e a técnica magneto elástica eram recomendadas para tensões ou gradiente de tensões próximos à superfície. A técnica de ultra-som foi indicada para a análise de tensões em camadas de 5 mm de espessura e estados de tensões volumétricos de grandes peças. As combinações das técnicas foram usadas para a avaliação de partes com microestrutura não homogênea e na caracterização dos estados micro-estruturais, em termos de dureza e de escoamento. A principal aplicação aconteceu em partes tratadas termicamente. As técnicas não eram de aplicação imediata e os aparelhos precisavam ser calibrados; no caso dos aparelhos magneto elásticos foi usado o medidor de ruído Barkhausen, que após a calibração só puderam ser usados em peças com a mesma microestrutura. A técnica do ultra-som usou o efeito acustoelástico baseado na velocidade de propagação das ondas, tendo a vantagem de poder ser usada em materiais não metálicos. Os investimentos nestes tipos de aparelhos somente se justificam quando existe uma série de peças de mesma estrutura a serem avaliadas (Schneider, 1998) (a).

Outros estudos foram feitos para estabelecer critérios de carga e limite de vida para rodas ferroviárias. Orringer et al., (1996) com o apoio do “Federal Railroad Administration” dos Estados Unidos, desenvolveram um critério baseado na tensão residual entre a roda e o trilho. A pressão de contato das cargas em serviço mudava gradativamente as tensões residuais na cabeça dos trilhos e no aro das rodas, em comparação com as tensões originais de fabricação. O estado resultante de tensões mostrou, perto da superfície, uma componente de compressão alinhada com a maior tensão, a qual protegia o contato superficial contra a propagação de fadiga. Quando a pressão de contato era alta suficiente, tensões residuais internas podiam ser desenvolvidas provocando trinca sub-superficial. O critério adotado pelos autores consistiu na criação de um índice baseado na pressão de contato roda – trilho que deveria ficar entre 4,5 e 5,0. O cálculo do índice estava relacionado com a carga das rodas e a geometria da roda e do trilho.

Pinos e placas de juntas de dilatação em pontes são partes críticas quanto ao tensionamento. As placas devem se movimentar livremente em torno dos pinos, porém a corrosão normalmente trava este movimento, aparecendo tensões normais e de torção que podem levar os pinos à ruptura. Normalmente a inspeção visual feita nos pinos não é suficiente, pois a corrosão impede um exame preciso. Clark et al.,(1999) aplicaram a técnica de medição das tensões por ultra-som em pinos e em placas utilizando transdutor eletromagnético e onda transversal. O transdutor eletromagnético foi escolhido por não necessitar de uma preparação da superfície e apresentar um bom acoplamento em superfícies metálicas lisas. No laboratório foi construído um dispositivo para simular o travamento do pino na placa, com o objetivo de comparar as tensões medidas, com valores de modelos teóricos. A técnica se mostrou eficiente para detectar tensões nos pinos e nas placas antes da ruptura.

As ligas de alumínio têm larga aplicação no campo da aeronáutica, sendo aplicadas em várias partes do avião. As chapas destes materiais (principalmente as mais finas) apresentam problemas de tensões internas durante a usinagem, problemas esses que precisam ser controlados na linha de fabricação. A técnica que melhor se adaptou a este controle foi o ultra-som, usando ondas superficiais de Rayleigh, que apresentavam movimentos elípticos e se propagavam na superfície de um sólido, com espessura menor do que o comprimento de onda.

Duquennoy et al., (1999) desenvolveram um método com o qual se media a velocidade das ondas de Rayleigh, em função do estado de tensão em folhas finas de material, que devido à espessura pequena, impedia o uso de ondas transversais ou longitudinais. As ondas de Rayleigh se propagavam na face lateral das folhas, com alta sensibilidade acustoelástica avaliando as tensões residuais. As direções principais de deformação foram admitidas coincidentes ao eixo de simetria do material. Os transdutores usados foram de 2,25 MHz, determinando a tensão biaxial ao longo da espessura da folha. O método mostrou-se insensível à anisotropia da textura do material no plano da laminação. Os diagramas de distribuição de tensão mostraram que a parte inferior das folhas, estava submetida à com tração e a superior à compressão, mostrando um perfil típico de tensão gerada no processo de têmpera, durante a fabricação das folhas. Os resultados obtidos foram comparados com métodos destrutivos, com dispersão dos resultados menor que 3%. O método permitiu a escolha do processo mais adequado de usinagem, visando minimizar o efeito da tensão residual.

As ondas do tipo L_{cr} (ondas longitudinais refratadas no primeiro ângulo crítico) são as mais indicadas para a medição de tensões usando o princípio acustoelástico, pois são mais sensíveis às mudanças de velocidade, em função da variação das tensões. Bray (1998), estudou este tipo de onda e fez a formulação matemática relacionando tensão com tempo de viagem da onda. Variações de temperatura e da textura do material foram consideradas por esse autor. O tempo de referência " t_0 ", para o material livre de tensões, precisou ser medido para calcular a variação das tensões, que foi formulada matematicamente em função de: módulo de elasticidade do material (E), constante acustoelástica (L), tempo de deslocamento da onda no material livre de tensões (t_0) e tempo de deslocamento da onda no material tensionado (t).

Santos Júnior e Bray (1999) mediram tensões em barras por ultra-som, usando ondas longitudinais refratada em ângulo crítico (L_{cr}). Os testes foram feitos usando um sistema de aquisição com placa de ultra-som de alta velocidade, instalado em micro computador e em instrumentos comerciais de baixa resolução, usados comercialmente para detectar trincas e espessura de materiais. Os resultados foram comparados aos obtidos com strain gages. Os ensaios comprovaram que a velocidade de propagação da onda longitudinal na direção do

carregamento, foi mais sensível a mudanças de tensão (Bray, 1976). O carregamento das barras, foi feito gradualmente por dois cilindros hidráulicos e a pressão foi controlada por manômetro. Os transdutores (emissor e receptor) foram colocados em sapatas de “plexiglass”, com ângulo crítico para gerar ondas longitudinais refratadas em L_{cr} , bem como, fixados em uma régua a uma distância fixa. Os resultados mostraram que os dois sistemas (computador pessoal e comercial) se aproximaram da tensão real (medida com strain gage), com erros de 12% para tensões da ordem de 20 MPa e 2% para tensões da ordem de 100 MPa .

Nesta mesma época, Santos Júnior et al., (1999) desenvolveram um sistema hidráulico para simular tensões em barras metálicas, com a aplicação de ondas de ultra-som longitudinais. Foi desenvolvido, em elementos finitos, um modelo para calcular a distribuição das tensões antes e depois do ensaio. A comparação dos resultados teóricos e experimentais obtidos comprovou que é possível identificar as regiões tracionadas e comprimidas dentro das barras, usando o sistema, bem como, provaram a viabilidade do uso do método não-destrutivo, para analisar tensões em componentes mecânicos.

A tensão residual é definida como sendo um estado de tensão que existe no material, sem a aplicação de forças externas, como, por exemplo: gradiente térmico (James e Lu, 1996). As tensões residuais, normalmente criadas durante o processo de fabricação das peças ou da matéria-prima, podem causar quebras e falhas durante o seu uso. Kypa et al., (1999) usaram a técnica de medição por ultra-som com as ondas L_{cr} (que tem um efeito acustoelástico maior na propagação do que as ondas transversais), para estudar o problema. Foi montado um sistema de duas placas fixadas por interferência, gerando tensões residuais, para testar a aplicação da técnica da birrefringência. Nas placas, as tensões foram medidas de duas formas: com strain gages (destrutivo) e calculadas por elementos finitos (teórico). Os resultados foram comparados com o sistema de ondas L_{cr} , o qual mostrou uma correlação muito forte com os resultados dos elementos finitos e com os strain gages. O sistema mostrou as tensões verdadeiras existentes no sistema, sendo considerada uma técnica excelente para solução de vários problemas de engenharia.

As tensões residuais internas também podem ser medidas baseadas no efeito acustoelástico, variando-se a velocidade de propagação da onda com a variação da tensão. Landa e Plešek (2000) fizeram estudos para esta aplicação. O trabalho mostrou que a dependência da tensão com a velocidade da onda, é devido a uma deformação finita do corpo, por uma relação tensão-deformação não linear do material. O efeito acustoelástico é muito pequeno e fatores como temperatura, textura, anisotropia e plasticidade do material não podem ser desprezados na medição de tensões residuais por ultra-som. Experimentalmente, foram medidas constantes acustoelásticas de três corpos-de-prova prismáticos por ensaio de compressão. Foram selecionados dois materiais isotrópicos (AlMg_3 e vidro óptico) e um anisotrópico (AlCu_4BiPb). As medições usaram duas técnicas distintas: pulso eco e ondas contínuas. A constante acustoelástica do AlMg_3 foi calculada teoricamente pela constante elástica de terceira ordem e o resultado comparado com o ensaio prático, com resultado inferior a 10% de diferença.

Bray (2000) descreveu aplicações da técnica de ultra-som, para medição de tensão superficial ao longo de comprimentos finitos. Aplicações específicas foram discutidas: na laminação, em placas de alumínio soldadas, em vasos de pressão, em rotores de turbina, em trilhos e em rodas ferroviárias. A técnica do ultra-som considerou a variação do tempo de percurso da onda, que foi relacionado com a tensão residual por meio da constante elástica de terceira ordem do material. A geração das ondas foi feita por transdutores piezoelétricos e a medição do tempo por placas de aquisição acopladas em computador pessoal, com capacidade de coletar uma amostra a cada 10 nanosegundos. O autor mediu a sensibilidade da variação da velocidade nos corpos-de-prova, mudando a direção de propagação das ondas. A variação mais significativa ocorreu com as ondas longitudinais propagadas na mesma direção das tensões. O tipo de onda usada foi a longitudinal refratada em ângulo crítico (L_{cr}), que mostrou ser mais sensível às variações de tensões do material. A medição experimental das tensões foi feita com dois transdutores (um receptor e outro emissor), colados em uma régua a uma distância fixa e pressionados para evitar a variação da camada do acoplante.

As ondas de volume são apropriadas para caracterizar propriedades volumétricas e as L_{cr} para superficiais e sub-superficiais. Sankar (2000) mostrou as vantagens do uso de ondas longitudinais refratadas no ângulo crítico (L_{cr}), em comparação a ondas de volume no ultra-som.

Foram medidas as velocidades das ondas L_{cr} em aço inoxidável AISI 304, com diferentes níveis de trabalho a frio (desde 0% até 50%). As ondas L_{cr} foram geradas usando sapatas de acrílico, com inclinação segundo o seu ângulo crítico, para gerar ondas superficiais. Foram usados seis placas de aço AISI 304, com diferentes níveis de trabalho a frio; os resultados foram apresentados em forma de gráficos. A variação de velocidade da onda L_{cr} , com o nível de trabalho a frio de cada placa, foi comparada com os resultados obtidos com a medição de ondas de volume. As ondas L_{cr} mostraram vantagens práticas em comparação com as de volume. O autor concluiu que as ondas L_{cr} viajam abaixo da superfície do material; logo, apresentam propriedades de ondas superficiais e de volume.

O uso da técnica do ultra-som para medir tensões em rodas ferroviárias, tem sido muito empregado nas ferrovias que operam com trens de alta velocidade na Europa,. Demilly et al., (2000) pesquisaram o uso de dois tipos de aparelho para esta aplicação. Os autores compararam a tensão residual de compressão, formada no aro das rodas ferroviárias forjadas, com os resultados de medição das tensões pelo método destrutivo (usando strain gages). Dois tipos de aparelho foram usados para medição das tensões: o Metalscan, com transdutores piezoelétricos e o EMAT, que usa transdutores eletromagnéticos. Os ensaios foram feitos em rodas novas, com medição das tensões de compressão, oriundas do processo de tratamento térmico, bem como, a medição das tensões em rodas de vagão de carga, submetidas a severas condições de frenagem. A pesquisa mostrou resultados de testes em dinamômetro, simulando uma série de frenagens, para determinar a carga térmica em rodas tipo H36, onde o foi discutido o efeito da carga térmica na tensão residual, durante a frenagem. A teoria da birrefringência, foi explicada para descrever o método usado. A pesquisa mostrou os limites de tensões medidas por ultra-som, para condenação de rodas em serviço nas ferrovias: French National Railway (SNCF) e German Railways (DB). Estas ferrovias usam o EMAT para avaliar tensões nas rodas em uso.

O Departamento Técnico da Trenitalia (UTMR – Unità Tecnologie Materiale Rotabile) usa a inspeção por ultra-som na área de manutenção dos trens, para detectar defeitos internos (trincas, vazios, inclusões) e para a medição de tensões em rodas usadas, utilizando transdutores piezoelétricos e a teoria da birrefringência. As rodas com tensão de tração no aro são removidas, por segurança, para evitar falhas por trincas térmicas. A resolução do sistema varia entre 30 – 40

MPa com valores de birrefringência em torno de $10^{-4} - 10^{-5}$, que necessita de um sistema de aquisição de dados da ordem de nanosegundos. A Trenitália tem intenção de desenvolver um sistema automático de inspeção por ultra-som, para trabalhar com o trem em movimento, usando água como acoplante. O sistema seria capaz de identificar cada roda inspecionada, com transdutores providos de vários graus de liberdade e um software, capaz de transmitir os resultados em tempo real. (Aruta et al., 2001).

A influência da microestrutura na medição de tensões superficiais por ultra-som mostra melhor visualização em testes com chapas soldadas, na qual, tem-se três regiões distintas e bem definidas: área do metal base, área termicamente afetada pela solda e área da solda (metal depositado). Experiências foram realizadas medindo a tensão residual nestas áreas e comparando os resultados com o método de difração de raios X e furação com broca, por Walaszek et al., (2000). Todas as medidas foram tomadas antes e depois do tratamento de alívio das tensões. As micrografias executadas após o tratamento térmico, para alívio de tensões, mostraram que as estruturas permanecem estáveis antes e após o tratamento. As constantes acustoelásticas, medidas por difração de raios X, após o tratamento térmico para alívio de tensões, mostraram que a constante acustoelástica na zona termicamente afetada, foi 90% do valor da constante acustoelástica do metal base, enquanto que, na solda esse valor foi de 80%. Ensaios provaram que a influência da textura do material no valor da tensão residual por ultra-som é de 10%. Quando a direção de laminação é conhecida, este valor pode ser reduzido. O ponto correto de calibração do ultra-som para tensão inicial (zero) foi observado para minimizar os erros. A pesquisa concluiu que, no caso de chapas soldadas, a calibração deve ser feita sempre no metal base, longe da solda e da área termicamente afetada. Algumas correções devem ser feitas na calibração do aparelho de ultra-som, para compensar os efeitos da microestrutura.

As constantes elásticas de segunda e terceira ordem são necessárias para determinar o estado de tensões por ultra-som. As constantes elásticas de segunda ordem são determinadas pela teoria elástica linear (independe do estado mecânico do material), enquanto que, as de terceira ordem precisam da teoria acustoelástica (requerem a aplicação de tensão). Os primeiros métodos usaram o ultra-som de contato direto, porém, há muita reflexão na camada do acoplante, sendo necessário o corte de várias amostras em direções diferentes (Bentahar, 2000).

A técnica do ultra-som por imersão começou a ser empregada em 2000, para eliminar a reflexão na camada do acoplante, pois pelo fato da peça estar mergulhada em uma cuba com água, era necessário o corte de apenas uma amostra. O acesso em apenas um lado da amostra, mesmo que fosse fina, era suficiente para determinar a velocidade das ondas em planos diferentes, visto que a varredura da peça era garantida por dois goniômetros. Uma máquina de tração foi adaptada num sistema de ultra-som por imersão, para caracterizar um material isotrópico (Aço A33). Dois planos perpendiculares, onde pelo primeiro passava a tensão aplicada (paralelo), que caracterizava a anisotropia do material, e o segundo (perpendicular) que caracterizava a isotropia do material. As constantes de segunda ordem foram determinadas variando o ângulo de incidência de cada plano, para diferentes tensões aplicadas. Visto que o material era isotrópico, os ângulos de incidência foram mudados nos planos paralelo e perpendicular, para conseguir quantidade suficiente de medidas, para uma boa precisão do valor da constante. A constante de terceira ordem não foi possível de ser determinada (os resultados foram parciais), porque a parte experimental precisou ser melhorada (Bentahar, 2000).

A técnica do ultra-som pode ser usada para medir a dureza em peças tratadas termicamente. O ultra-som por imersão foi usado para medir a velocidade das ondas, da atenuação longitudinal e transversal, caracterizando a dureza do material. Uma amostra de aço em forma de cilindro, cortada ao meio, com alto gradiente de dureza, foi submetida ao ensaio Jominy, após a têmpera. Este ensaio consiste em aquecer o material acima da zona de transformação e resfriar com água pela parte inferior, provocando um gradiente de dureza no cilindro. A dureza e o gradiente foram medidos com durômetro Vickers, obtendo-se a curva de variação da dureza em função da profundidade de têmpera (quanto mais afastada da face resfriada com água, menor será a dureza). Na posição normal foi medida a velocidade da onda longitudinal e as amplitudes dos ecos de fundo; na posição oblíqua, foi medida a velocidade da onda transversal e as amplitudes dos ecos de fundo. A variação dos coeficientes de atenuação, obtidos pelos ecos de fundo e das velocidades das ondas, forneceu uma curva de gradiente de dureza próxima àquela obtida com o durômetro Vickers, provando que é possível medir o gradiente de dureza de uma peça, pela diferença das velocidades das ondas longitudinais ou

transversais, ou pela diferença de atenuação dos ecos de fundo transversal ou longitudinal (Bouda et al., 2000).

Temsamani et al., (2002) usaram a técnica do ultra-som com ondas superficiais, para a caracterização de materiais. A técnica usou a redundância de informações do feixe sônico. Neste tipo de aplicação foram analisadas as possíveis formas de geração de ondas superficiais, que se propagavam entre a superfície do material que foi analisado e o fluido acoplante (“leaky waves”). Quando a incidência de ondas ocorre no material em ângulos críticos, acontecem vários fenômenos, que não seguem as leis geométricas do feixe sônico, como, por exemplo, a mudança da posição teoricamente esperada do feixe refletido. A explicação para este fenômeno está na energia de radiação do campo das “leaky waves” dentro dos limites do fluido. O modelo teórico foi baseado na combinação de ondas harmônicas complexas (Complex Harmonic Waves - CHW). Quando a mudança de direção do feixe refletido das “leaky waves” ocorre, existe a indicação que o material não é homogêneo naquela parte da superfície, indicando que algumas ondas CHW não foram refletidas, razão pela qual o limite do feixe refletido tem uma amplitude totalmente diferente da distribuição especular. A estimativa destas mudanças de direção, em diferentes frequências, foi de muito interesse para determinar as propriedades do material. Esta técnica ainda encontra-se em fase experimental para validação em diferentes materiais, visto que, a parte prática deste trabalho foi feita apenas com placa de alumínio.

O conhecimento das constantes acustoelásticas geralmente torna-se necessário para estimar as tensões residuais por ultra-som; porém, a sua determinação por métodos experimentais é difícil, principalmente pela forma geométrica das peças. Existe, desta forma, a necessidade de uma expressão matemática para calcular estas tensões, validada por comparação com resultados práticos. Os coeficientes acustoelásticos das ondas de Rayleigh, para um material ortotrópico, podem ser teoricamente determinados conforme suas características: densidade e constantes acustoelásticas de segunda e terceira ordem. Quando as tensões estão localizadas perto da superfície, a energia de propagação da onda pode ser direcionada ao longo da superfície, entre um emissor e um receptor. Entre as ondas superficiais, as ondas de Rayleigh são particularmente interessantes, porque se propagam sem perda de radiação e a energia é concentrada dentro de um comprimento de onda, o que torna possível medir o gradiente de tensão, usando diferentes

freqüências. Mais recentemente, a geração de ultra-som por laser tem sido usada onde as ondas são geradas por impacto e a detecção feita por interferômetro, sem contato com a superfície do material. Este tipo de aplicação evidencia a alta sensibilidade das ondas de Rayleigh para o efeito acustoelástico, na medição das tensões residuais. Para obter expressões literais das constantes acustoelásticas, se estabeleceram expressões da velocidade das ondas ultra-sônicas com o material tensionado. Os bons resultados das aproximações entre os valores teórico e prático, indicam a validade das expressões matemáticas para a tensão superficial, baseadas nos coeficientes acustoelásticos das ondas de Rayleigh. Esta forma de estimar as tensões residuais é muito útil, no caso das características do material a ser analisado não estarem disponíveis para uma medição direta (Duquennoy et al., 2002).

No Laboratório de Acustoelástica da Universidade de Campinas foi desenvolvido um sistema automático para medição da constante acustoelástica, o qual relaciona a variação do tempo de percurso com a tensão. O sistema foi desenvolvido para calcular as tensões através da medição do tempo de percurso de ondas longitudinais superficiais ('Lcr waves), utilizando a teoria acustoelástica. Para a geração das tensões foi construído um conjunto mecânico, que consiste numa máquina de tração com dois atuadores hidráulicos, possibilitando o conhecimento da força aplicada por meio de um manômetro digital. O sistema permite determinar a constante acustoelástica, cujo valor possibilita avaliar o estado de tensões em componentes mecânicos (Andrino, 2002).

Capítulo 3

Processo de Fabricação das Rodas Ferroviárias e Simulação das Tensões Atuantes com Elementos Finitos

Neste capítulo será descrito todo processo de fabricação das rodas ferroviárias forjadas, tomando-se como base o processo utilizado pela MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, bem como será mostrada uma análise de elementos finitos simulando as tensões no aro das rodas forjadas devido ao processo de fabricação. Algumas características importantes das rodas e as principais normas de fabricação também serão abordadas neste capítulo.

3.1. Características do Produto

As rodas ferroviárias forjadas são fabricadas segundo normas internacionais, sendo as mais usadas UIC (Union Internationale des Chemins de Fer) e AAR (American Association of Railroads). Para facilitar o estudo e a familiarização de termos, a figura 3.1 mostra uma roda ferroviária com a nomenclatura de suas respectivas partes:

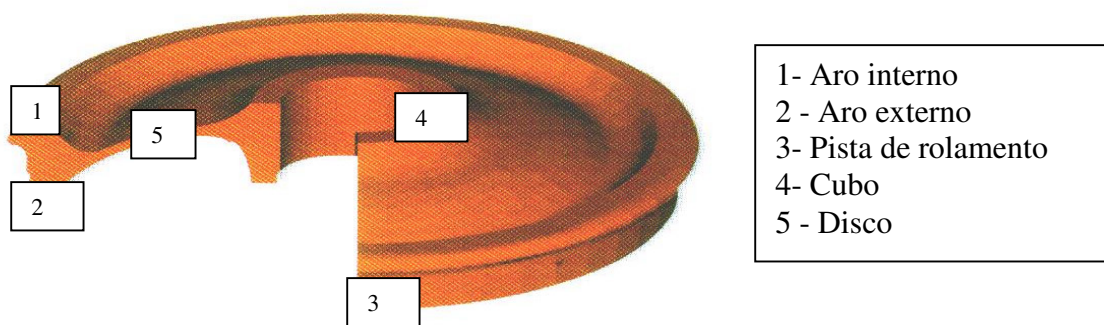


Figura 3.1: Partes da roda ferroviária.

Conforme norma AAR M107, as rodas ferroviárias podem ser divididas em classes de acordo sua utilização. Segundo seu uso, podem ser definidas como:

- **Classe L:** serviços de alta velocidade, frenagens severas e contínuas e baixa carga por roda.
- **Classe A:** serviços de alta velocidade, condições severas e contínuas de frenagem e carga moderada por roda.
- **Classe B:** serviços de alta velocidade, frenagens severas e contínuas e alta carga por roda.
- **Classe C:** serviços com condições suaves de frenagem e alta carga por roda. Poderá ser usada com condições severas e contínuas de frenagem com o emprego de discos de freio.

As recomendações para o emprego das classes citadas podem ser também:

- **Classes B e C:** normalmente usadas para vagões de carga e locomotivas.
- **Classes L, A e B:** normalmente usadas para carros de passageiros.

As classes das rodas, segundo a AAR, são definidas pela faixa de dureza e pela composição química, conforme tabela 3.1.

ELEMENTOS QUÍMICOS	CLASSES			
	L	A	B	C
CARBONO	< ,47	,47/,57	,57/,67	,67/,77
MANGANÊS	,60/,85	,60/,85	,60/,85	,60/,85
FÓSFORO	< ,05	< ,05	< ,05	< ,05
ENXÔFRE	< ,05	< ,05	< ,05	< ,05
SILÍCIO	> ,15	> ,15	> ,15	> ,15
DUREZA (BHN)	277- 197	321 - 255	341 - 277	363 - 321

Tabela 3.1: Composição química conforme AAR.

O valor da dureza é medido na face do aro externo a 25 mm da pista de rolamento, conforme a figura 3.2.

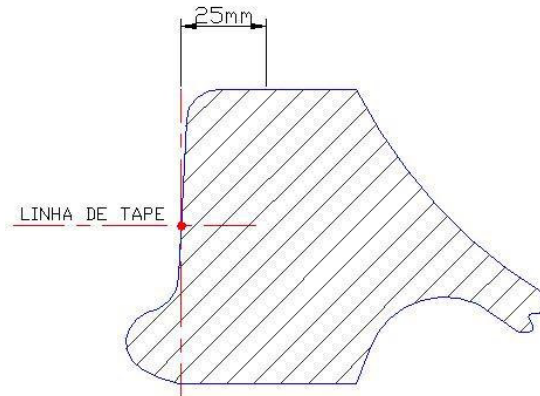


Figura 3.2: Posição de medição da dureza.

A composição química definirá a dureza das rodas após o tratamento térmico, principalmente o teor de carbono, principal elemento de diferenciação entre as classes, pela norma AAR.

A norma UIC classifica as rodas em graus que variam de R1 a R9. A tabela 3.2, mostra as aplicações típicas das rodas segundo a UIC. A diferença entre os graus está na composição química e na resistência à tração. Por esta norma é obrigatória a destruição de uma roda por corrida para ensaios físicos e metalográficos.

TIPO DE CARRO	GRAU	ALTERNATIVA
VAGÃO	R7	R1*
CARROS COM FREIO NA RODA	R6/R7	R1*
CARROS COM DISCO DE FREIO	R7	
LOCOMOTIVAS	R7	
TREM UNIDADE COM FREIO NA RODA	R6/R7	
TREM UNIDADE OUTROS CASOS	R7	

* Deve ser usado em casos de baixa carga térmica (frenagens leves).

Tabela 3.2: Materiais das rodas segundo a Norma UIC.

Na norma UIC as rodas podem ser temperadas e revenidas (T/R) ou normalizadas (N); a tabela 3.3 mostra os diversos graus com os respectivos tipos de tratamento térmico e valores de tensão de ruptura.

GRAU	TRATAMENTO TÉRMICO	TENSÃO RUPTURA (N/mm ²)	IMPACTO (JOULES)	REDUÇÃO DE AREA (%)
R1	N	600/720	18	15
R2	N	700/840	10	14
R3	N	800/940	10	10
R6	T/R	780/900	15	15
R7	T/R	820/940	14	15
R8	T/R	860/980	13	15
R9	T/R	900/1050	12	10

Tabela 3.3: Características físicas das rodas, segundo a norma UIC.

Na norma UIC o grau das rodas também é definido pela composição química, onde o elemento de variação é o carbono, conforme a tabela 3.4:

	GRAU						
	R1	R2	R3	R6	R7	R8	R9
CARBONO	,48	,58	,70	,48	,52	,56	,60
SILÍCIO	,50	,50	,50	,40	,40	,40	,40
MANGANÊS	,90	,90	,90	,75	,80	,80	,80
FÓSFORO	,035	,035	,035	,035	,035	,035	,035
ENXÔFRE	,035	,035	,035	,035	,035	,035	,035
CROMO (Cr)	,30	,30	,30	,30	,30	,30	,30
COBRE	,30	,30	,30	,30	,30	,30	,30
MOLIBIDÊNIO (Mo)	,08	,08	,08	,08	,08	,08	,08
NÍQUEL (Ni)	,30	,30	,30	,30	,30	,30	,30
VANÁDIO	,05	,05	,05	,05	,05	,05	,05
Cr+Mo+Ni (máximo)	,05	,05	,05	,05	,05	,05	,05

Tabela 3.4: Composição química, segundo a norma UIC.

3.2 Processo de Produção

As rodas ferroviárias podem ser forjadas ou fundidas. A principal diferença está no processo produtivo; as rodas forjadas podem ser usadas em qualquer tipo de aplicação, enquanto que as fundidas podem ser usadas apenas no transporte de carga.

O processo de fabricação das rodas forjadas é mostrado a seguir, na mesma sequência da fabricação, tomando-se como base o processo usado pela MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, que doou as rodas para esta pesquisa.

3.2.1 Aciaria

O processo começa com a fabricação do aço em forno elétrico, partindo-se de sucata metálica. O acerto da composição química é feito com adição de elementos de liga. Durante a fusão são retiradas várias amostras do metal, que são analisadas em espectrômetro de emissão óptica para verificar sua composição química. Quando o metal líquido estiver com a composição química correta, é vazado nas lingoteiras, conforme a figura 3.3.



Figura 3.3: Lingotamento do aço.

Após a solidificação, os lingotes são retirados das lingoteiras e colocados em fossas refratárias para resfriamento lento por 12 horas, visando evitar trincas superficiais, conforme a figura 3.4. Depois do resfriamento, os lingotes são transportados para área do corte a quente.

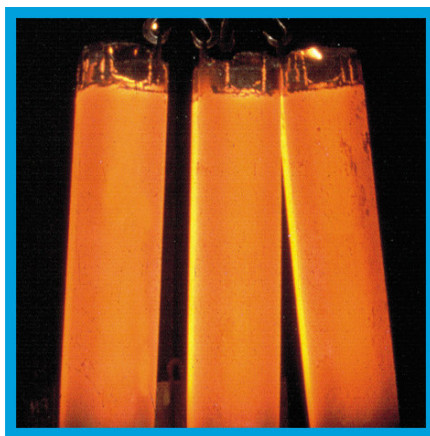


Figura 3.4: Lingotes após remoção das lingoteiras.

3.2.2 Corte a Quente

A primeira etapa de fabricação no forjamento é o corte dos lingotes em blocos por oxicorte, conforme a figura 3.5. O tamanho dos blocos é proporcional ao peso da roda acabada. Após o corte, os blocos são pesados e enformados.



Figura 3.5: Corte dos blocos por oxicorte.

3.2.3 Forjamento

No forjamento a primeira etapa é o enformamento dos blocos para aquecimento. Nesta etapa os blocos atingem temperaturas em torno de 1100 °C. Após o aquecimento, os blocos são retirados um a um do forno e passam por um jateamento de água a alta pressão (200 kgf/cm²) para remover a carepa (pele) formada no processo de aquecimento. Na seqüência, as rodas são forjadas em prensa de 6000 toneladas. Nesta etapa, a roda tem um formato bem definido, conforme a figura 3.6 (a). A etapa seguinte é a laminação, onde é formada a superfície de rolamento da roda juntamente com o friso, por meio de transferência de material do disco da roda para a pista, conforme a figura 3.6 (b).



Figura 3.6: Forjamento e laminação das rodas.

A última etapa do processo de forjamento é a prensagem final para conformar o disco da roda e puncionar o furo central. Esta operação é feita em prensa de 1500 toneladas. No final do forjamento a temperatura da roda esta em torno de 900 °C. As rodas, após o forjamento, são colocadas em fossas refratárias cobertas para um resfriamento lento e controlado por 12 horas, conforme a figura 3.7.



Figura 3.7: Fossa de resfriamento controlado.

3.2.4 Tratamento Térmico

As rodas, após o resfriamento, são aquecidas em fornos elétricos à temperatura de 840 °C. Após o aquecimento, as rodas são temperadas em água sob pressão na temperatura ambiente (25 °C – 35 °C), por meio de bicos espalhados ao longo da superfície de rolamento da roda (parte de contato com o trilho), garantindo a dureza da roda nesta região. Após a têmpera em água, as rodas são revenidas a temperaturas entre 450 °C e 500 °C para alívio de tensões em fornos elétricos. Nesta etapa da fabricação se determina a dureza que irá definir, junto com a composição química, a classe da roda. A figura 3.8 mostra a têmpera das rodas.



Figura 3.8: Têmpera em rodas ferroviárias.

O processo de tratamento térmico é a fase mais importante no estudo das tensões residuais, pois é nesta etapa da fabricação que a roda adquire tensão residual de compressão ao longo do aro. Esta tensão de compressão circunferencial é benéfica para roda, pois previne a ocorrência de trincas por fadiga nas rodas em serviço.

A tensão residual de compressão é função da têmpera no aro que produz uma deformação plástica permanente nesta região. Quando os jatos de água atingem a superfície quente do aro da roda existe um resfriamento rápido e uma contração. No mesmo instante, o material da roda abaixo da região resfriada (temperada) ainda está quente, com conseqüente redução da tensão de escoamento. As fibras internas do aro e do disco encontram-se em compressão pelo resfriamento, ocorrendo, desta forma, o escoamento das fibras externas. No resfriamento da roda, as fibras internas do aro e do disco estão menores do que estavam originalmente durante o escoamento em compressão; porém, algumas áreas tentam se acomodar dentro de um espaço grande. Este processo resulta em tensão de tração na parte inferior do disco e do aro, e compressão na parte externa.

O nível inicial de tensão residual das rodas, obtido no processo de tratamento térmico, é consideravelmente mudado durante o uso da roda. Porém, o nível inicial de tensão das rodas novas tem um efeito substancial na redistribuição das tensões durante o ciclo de vida da roda, desde o início de uma falha até a fratura total. Os parâmetros do tratamento térmico são ferramentas importantes para determinar o nível das tensões residuais, especialmente a composição química do material e o tempo de resfriamento na têmpera.

3.2.5 Usinagem

As rodas forjadas são totalmente usinadas, com a seqüência de usinagem padrão dada por:

- Usinagem do aro interno;
- Usinagem do furo central;
- Usinagem da pista de rolamento, aro e cubo externo;
- Usinagem do disco externo;

A próxima fase é o controle dimensional de toda a roda; no caso da MWL Brasil este controle é feito com instrumentos de medição (paquímetros, gabaritos e dispositivos) e com braço eletrônico tridimensional.

As rodas depois de inspecionadas e aprovadas são protegidas contra corrosão e embaladas para embarque (Minicucci, 2000).

3.3 Simulação com Elementos Finitos

O Laboratório Ferroviário da UNICAMP simulou, por elementos finitos, as tensões existentes no aro da roda forjada devido ao processo de fabricação (Santos, 2003). Para a simulação foram utilizados os dados de processo da MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, na parte de forjamento e tratamento térmico. A roda analisada foi a mesma utilizada nesta pesquisa, tanto no tocante ao material como à forma geométrica.

O modelo usou o software ANSYS (versão 6.0). O modelo foi tratado como assimétrico e todo carregamento aplicado foi distribuído em torno da circunferência da roda. Por este motivo o modelamento foi feito apenas no plano que contém o perfil da roda. O tipo de elemento usado foi o “couple field”, que permite a análise térmica e estrutural ao mesmo tempo; na nomenclatura do software o elemento recebe o nome de “plane 13”. As propriedades térmicas e mecânicas foram obtidas da norma AAR para material classe C (AAR, 1994). A tabela 3.5 mostra as propriedades utilizadas. Para o coeficiente de convecção, foi usado o valor de $25 \text{ W/mm}^2\text{°C}$, considerou-se que toda a região trocou calor desta forma.

E (Pa)	Poisson	G (Pa)	Coeficiente de expansão térmica - α (1/K)	Densidade (kg/m^3)	Calor específico (J/kg*K)
0,21E+12	0,28	0,79E+11	0,13E-04 / Kelvin	0,77E+04	0,46E+03

Tabela 3.5: Propriedades térmicas e mecânicas.

A figura 3.10 mostra a distribuição das tensões no aro da roda ao longo de toda sua espessura, enfatizando a região média do aro onde foram medidas as tensões (Santos, 2003).

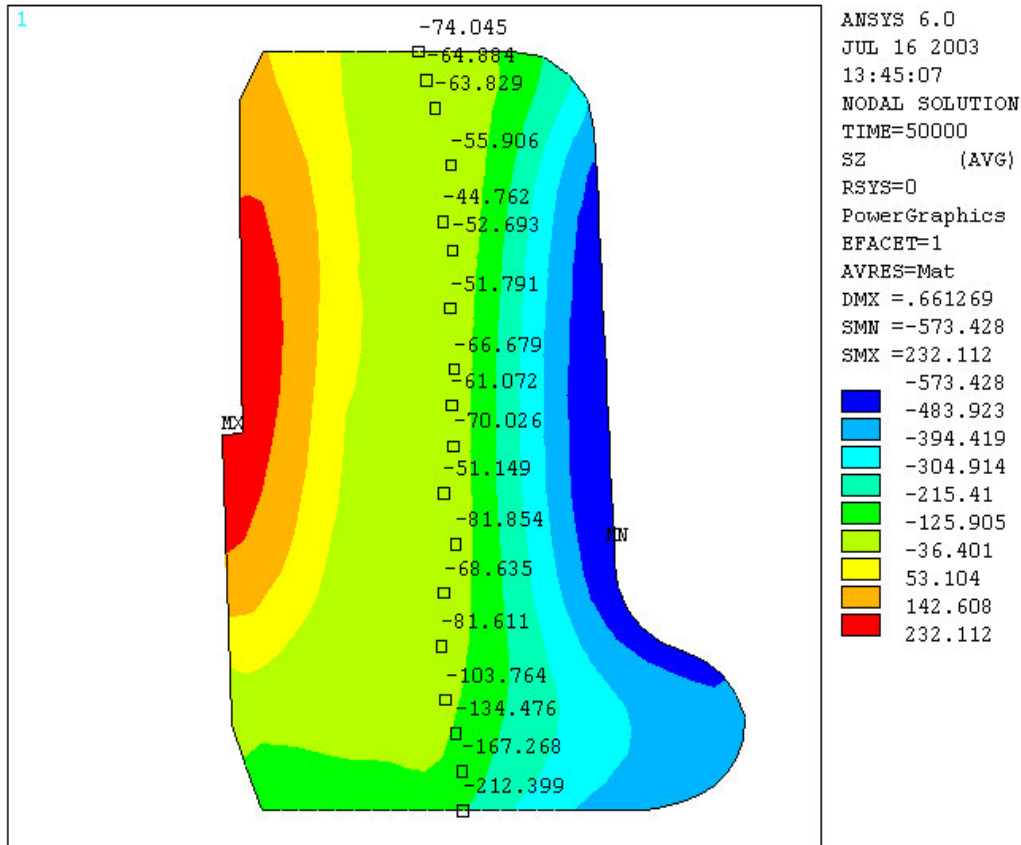


Figura 3.10: Simulação das tensões devido ao processo de fabricação.

Os procedimentos atualmente utilizados para a avaliação de tensões por ultra-som baseiam-se na birrefringência. Este método, conforme já detalhado anteriormente, consiste na medição do tempo de percurso de duas ondas cisalhantes propagando-se ao longo da espessura da peça em análise. Mesmo considerando que a simulação apresentada não levou em conta alguns fatores importantes no cálculo das tensões, como a anisotropia do material, os resultados fornecem uma indicação de que há uma variação de tensões ao longo do caminho percorrido pela onda. Neste caminho, a variação mostrada na simulação é de -74 MPa até -212 MPa. Qualquer método que fosse utilizado para medir as tensões ao longo dessa dimensão, apresentaria como resultado um valor intermediário, não necessariamente o valor médio.

A grande vantagem do método que utiliza ondas longitudinais criticamente refratadas é que este pode ser utilizado para medir em qualquer ponto da superfície, até mesmo no ponto de maior magnitude de tensões, como aquele mostrado com o valor de -212 MPa. Além disso, ondas longitudinais são mais sensíveis à variação de tensões.

Todas as medidas feitas nesta pesquisa, valores de tensão, tempo de referência (t_0) e constante acustoelástica, tiveram como base o lado interno da roda. Conforme mostra a análise de elementos finitos, esta é a região de maior tensão de compressão. A posição e o tipo de onda utilizadas caracterizam o novo método proposto para medição de tensões em rodas ferroviárias.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo será descrita toda metodologia usada para o desenvolvimento do trabalho experimental, tendo como suporte a revisão bibliográfica e os conceitos básicos do capítulo 2.

4.1 Método de Abordagem

A MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, forjou 12 rodas ferroviárias tipo D-38 com diâmetro da pista de 38”(965 mm), classe C (AAR), para a execução da parte experimental deste trabalho. As rodas foram forjadas da mesma corrida (D-1001), com a composição química da tabela 4.1.

Carbono	Manganês	Silício	Cromo	Fósforo	Enxofre	Níquel	Molibdênio	Alumínio	Cobre
,74%	,74%	,029%	,022%	,010%	,007%	,04%	,013%	,016%	,03%

Tabela 4.1: Composição química das rodas usadas na parte experimental.

Na confecção das rodas adotou-se o processo de fabricação, conforme o capítulo 3, sendo que a temperatura de forjamento das rodas foi de 966 °C. Após o forjamento, as rodas foram tratadas termicamente em fornos elétrico de quatro zonas, conforme processo da tabela 4.2.

Os tempos de permanência no forno, resfriamento e temperaturas foram calculados levando em consideração o material da roda e as propriedades mecânicas a serem atingidas.

TIPO DE RODA	TÊMPERA		RESFRIAMENTO		REVENIMENTO	
	Temperatura por zona (°C)	Tempo (horas)	Temperatura da água (°C)	Tempo (minutos)	Temperatura por zona (°C)	Tempo (horas)
D 38	1 - 750	3,6	Máxima: 50 °C	8,81	1 - 507	3,0
	2 - 830				2 - 507	
	3 - 880				3 - 507	
	4 - 865				4 - 507	

Tabela 4.2: Processo de tratamento térmico.

Após o tratamento térmico, as rodas foram usinadas e inspecionadas na MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda. Nesta inspeção foram verificados os seguintes itens para todas as rodas: ultra-som no aro e cubo, partículas magnéticas no disco, dureza e dimensional. Em todos os testes as rodas foram consideradas aprovadas. Os resultados para dureza das rodas estão na tabela 4.3.

TIPO DE RODA	NÚMERO DE SÉRIE	DUREZA (BHN)
D 38	100131	292
	100132	292
	100133	294
	100134	292
	100135	292
	100136	296
	100137	296
	100138	294
	100139	296
	100140	294
	100141	296
	100142	292
MÉDIA		294
DESVIO PADRÃO		0,58
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO		0,002

Tabela 4.3: Valores de dureza das rodas em BHN.

Após a inspeção final, as rodas seguiram para o ‘shot peening’ (jateamento com granalhas), para alívio das tensões superficiais.

4.2 Determinação da Constante Acustoelástica com Ondas L_{cr}

A constante acustoelástica foi determinada por meio de ensaios em chapas (corpos-de-prova) retiradas das rodas. Os ensaios foram feitos em uma bancada montada nas instalações da MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, em local com isolamento térmico e temperatura controlada.

a) Corpos-de-Prova

Duas rodas, tipo D38 representativas do lote, foram cortadas em quatro partes iguais, em ângulos de 90° , e de cada parte foi extraído um corpo-de-prova em forma de chapa, na região do aro interno da roda, perfazendo um total de oito peças conforme a figura 4.1.

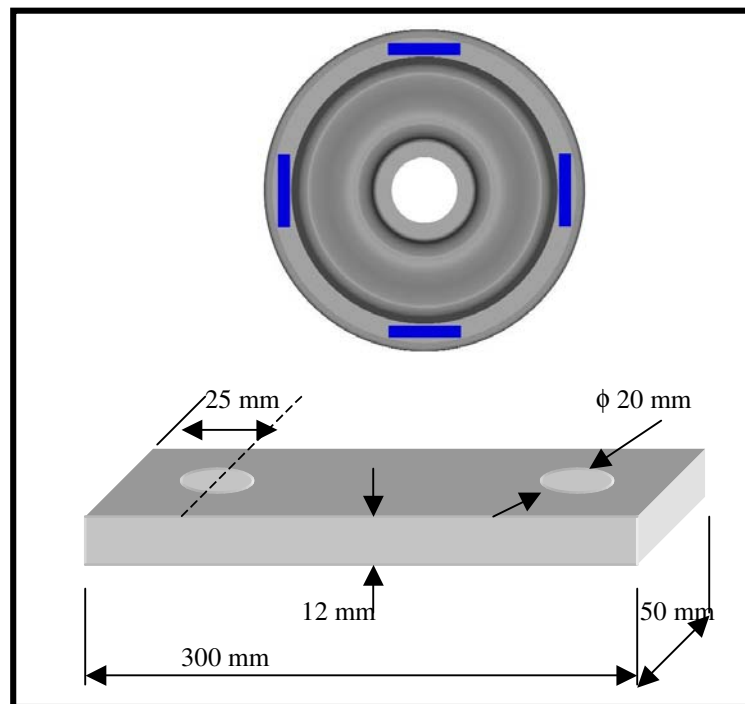


Figura 4.1: Detalhe dos corpos-de-prova das rodas.

Os corpos-de-prova foram extraídos exatamente da região onde foram feitas as medições do tempo de percurso das ondas com ondas longitudinais criticamente refratadas. Esta área é

afetada pelo processo de tratamento térmico e laminação. A extração do corpo-de-prova desta área é a melhor condição para cálculo da constante acustoelástica real do material da roda ferroviária classe C. A figura 4.2 mostra também as linhas de laminação no aro da roda.

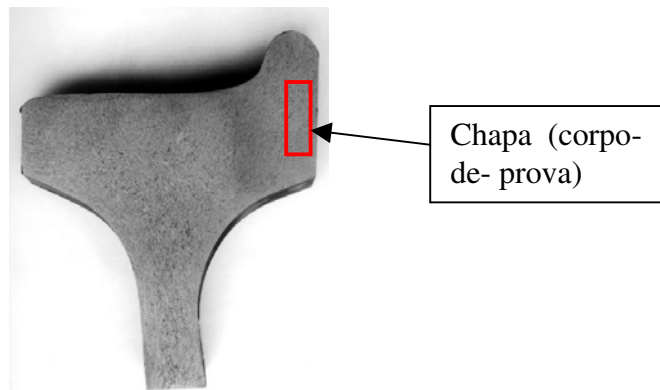


Figura 4.2: Perfil da roda com a localização da chapa (corpo-de-prova).

As chapas foram analisadas utilizando-se elementos finitos, com o objetivo de calcular as tensões internas atuantes (principalmente na região dos furos) e verificar se as mesmas não iriam afetar a medição das tensões na parte central. A análise mostrou que as tensões geradas ao redor dos furos, afetam, no máximo, até 10 mm de distância dos mesmos, possibilitando a realização dos ensaios com 210 mm de comprimento livre para as medições, conforme a figura 4.3, na qual os 105 mm indicam metade do comprimento da chapa. A análise foi feita com o auxílio do software Cosmos, versão 2.7, simulando apenas metade da barra por se tratar de peça simétrica, usando elementos tipo sólido. O material usado foi o aço considerado com as seguintes características:

- Módulo de elasticidade: 210 GPa;
- Coeficiente de Poisson: 0,28;
- Módulo de elasticidade transversal: 79 GPa;
- Densidade: 7.700 kg/m^3 ;
- Carga de tração: 86.000 N.

A carga usada na análise foi baseada em ensaios feitos no laboratório de acustoelástica da UNICAMP em chapas de aço laminadas (Andrino 2002) e se refere ao valor que não causaria escoamento, considerando um fator de intensificação de tensões de 3,0 no furo.

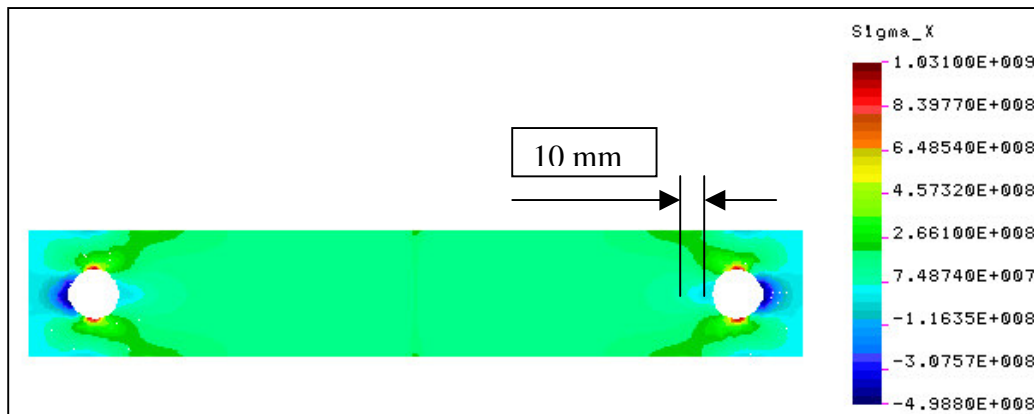


Figura 4.3: Análise de elementos finitos no corpo de prova (Tensões em Pa).

Os corpos-de-prova, depois de cortados e usinados, passaram por tratamento térmico para alívio das tensões, conforme processo:

- Tempo de residência no forno: 2 horas /chapa;
- Temperatura: 250 °C.

b) Bancada de Teste e Dispositivos para Levantamento da Constante Acustoelástica

O sistema utilizado neste trabalho visa ser parte integrante da linha de inspeção final de rodas da MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, com o objetivo de medir tensões residuais em rodas novas por amostragem, atendendo à nova norma EN 13262, e eliminando o ensaio destrutivo (corte por serra) feito atualmente.

O equipamento utilizado foi testado previamente no Laboratório de Acustoelástica da UNICAMP.

A parte experimental teve como objetivo relacionar a variação da tensão com o tempo de percurso da onda ultra-sônica longitudinal.

Um dispositivo hidráulico para tracionar as chapas extraídas das rodas foi especialmente construído. O dispositivo é composto por dois cilindros hidráulicos (indicado com a letra “A”), uma bomba manual e um manômetro digital, conforme a figura 4.4.

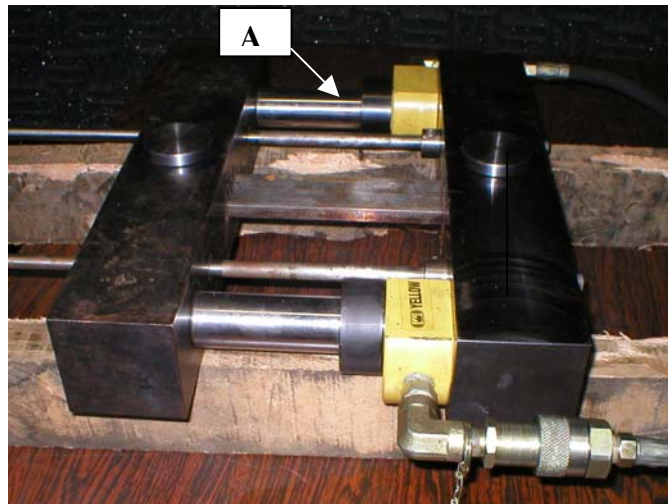


Figura 4.4: Dispositivo para tracionar chapas (corpos-de-prova).

Dois cabeçotes de ondas longitudinais de 2,25 MHz foram montados em sapatas de acrílico de modo a atingir a superfície da peça com um ângulo de 28° (ondas L_{cr}). Os cabeçotes foram fixados em uma régua de alumínio a uma distância de 112 mm, conforme a figura 4.5.

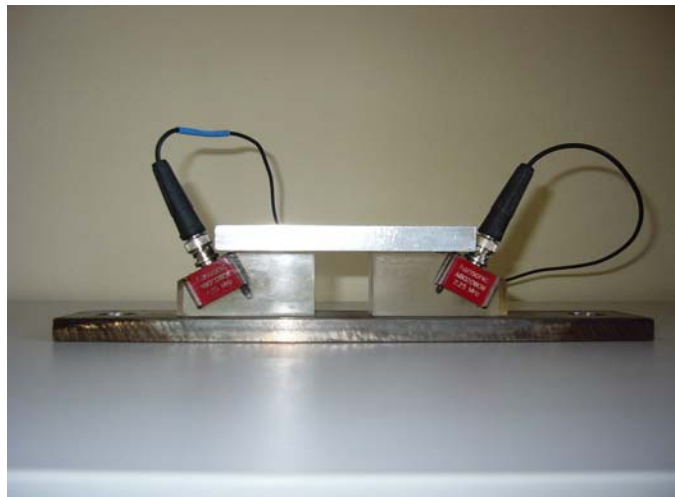


Figura 4.5: Sistema de fixação dos cabeçotes para ondas L_{cr} .

Para controlar a força aplicada nos cabeçotes foi usada uma célula de carga acoplada em um grampo ‘C’. A força aplicada em todas as medições foi controlada em cerca de 800 N (80 kgf).

c) Método de Ensaio

Cada chapa retirada da roda foi colocada no dispositivo e tracionada até a pressão de 300 bar, iniciando por zero (tempo t_0), 100, 200 e 300 bar. A cada estágio da pressão, os cabeçotes foram colocados nas chapas e fixados com o grampo ‘C’, juntamente com a célula de carga, conforme a figura 4.6.

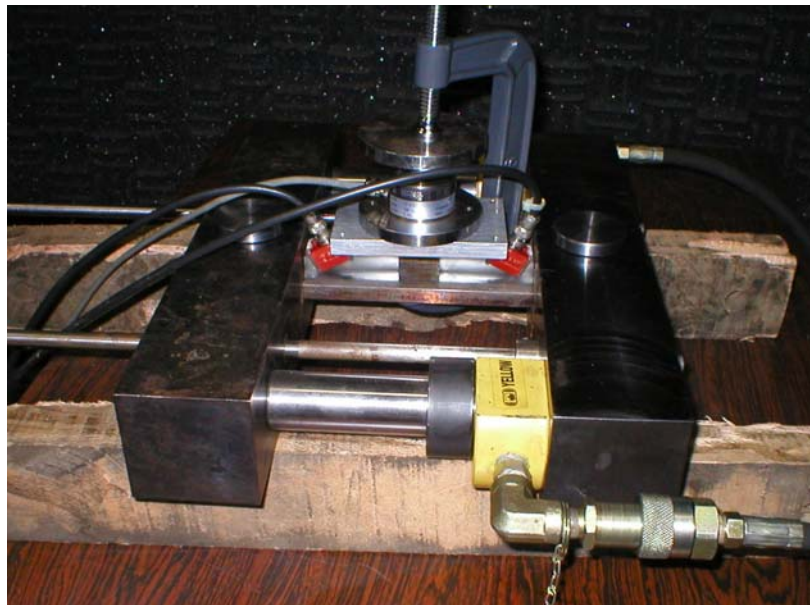


Figura 4.6: Dispositivo montado para ensaio nas chapas

O tempo de percurso da onda foi medido pelo programa de aquisição de dados L-Stress. A cada ensaio e com o valor da pressão aplicada nos dois pistões e suas respectivas áreas, calcula-se a força aplicada na chapa, conforme segue:

$$F = P(2A_p) \quad (4.1)$$

Onde:

F- força aplicada na chapa.

P- pressão medida no manômetro.

A_P – área dos pistões.

Com o valor da força aplicada nas chapas, calcula-se a tensão real nas chapas, conforme a equação (4.2):

$$\sigma = \frac{F}{A_{CH}} \quad (4.2)$$

Onde:

σ - tensão real na chapa

F – força aplicada nas chapas (equação 3.1)

A_{CH}- área da secção transversal da chapa

Com o valor do tempo de percurso, usamos a equação que relaciona tensão com tempo de percurso da onda, deduzida no capítulo 2 como equação (2.40), conforme segue:

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (2.40)$$

Integrando a equação (2.40), temos:

$$\sigma = \frac{E}{L_{11}t_0^*} \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta t = t - t_0 \quad (4.3)$$

Onde:

σ - tensão na chapa tracionada (igual a tensão real);

E – módulo de elasticidade do aço (2,07 E+05 MPa);

L_{11} - constante acustoelástica;

t_0^* – tempo de referência;

t - tempo de percurso da onda na chapa tensionada;

t_0 . tempo de percurso da onda no material livre de tensão (Pressão hidráulica zero.)

O tempo t_0^* é o tempo de referência dado pela equação (4.4):

$$t_0^* = \frac{D_c}{V_A} \quad (4.4)$$

Onde:

D_c - distância entre os cabecotes (112 mm);

V_A – velocidade da onda longitudinal no aço (5900 m/s), no estado livre de tensões;

t_0^* – tempo de referência (calculado em 18.938,1 nanosegundos).

Com o resultado do tempo de percurso da onda na chapa livre de tensão tornou-se possível obter t_0 . O tempo de percurso da onda t na chapa tensionada foi obtido nos estágios de 100, 200 e 300 kgf/cm². Com estes dados foi possível obter um valor numérico do produto tensão x constante acustoelástica, a cada nível de pressão ensaiado, conforme (4.5).

$$\sigma L_{11} = K_1 \quad \Rightarrow \quad K_1 = \frac{E}{t_0^*} \Delta t \quad (4.5)$$

Onde:

σ - tensão aplicada na chapa tracionada;

L_{11} - constante acustoelástica;

K_1 - valor numérico obtido com os dados de cada ensaio a partir das ondas ultra-sônicas.

Com o valor da tensão real na chapa calculada pela equação (4.2) e o valor do produto da tensão x constante acustoelástica da equação (4.5), foi possível construir um gráfico onde o

coeficiente angular da reta corresponde ao valor da constante acustoelástica conforme a figura 4.7.

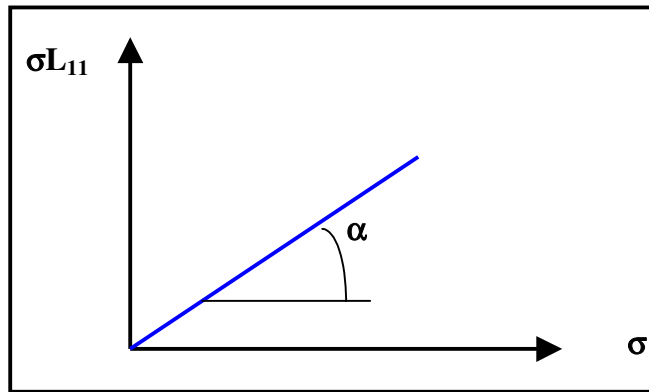


Figura 4.7: Gráfico para determinar o valor de L_{11} .

Pelo gráfico da figura 4.7, foi possível determinar o valor da constante acustoelástica, conforme segue:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\sigma L_{11}}{\sigma} \quad \Rightarrow \quad \operatorname{tg}(\alpha) = L_{11} \quad (4.6)$$

Para cada chapa ensaiada será obtido um valor de L_{11} ; o valor final será a média dos valores de todas as chapas.

d) Programa de Aquisição de Dados

O programa “L-Stress”, para aquisição dos tempos de percurso das ondas L_{cr} e ondas transversais (cisalhantes), foi construído em uma plataforma gráfica LabVIEW V6i, pelo Laboratório de Acustoelástica da UNICAMP (Andrino 2002). O programa trabalha com uma placa de aquisição de dados NI 5911, da National Instruments, que tem uma taxa de aquisição de 100 MHz com um canal.

O programa é composto de cinco telas, sendo a primeira delas de apresentação do programa. Na tela de dados iniciais são inseridas informações referentes ao: excitador de pulsos,

propriedades do material e dimensões, número de passos de carga (pressões), número de repetições e número médio de ondas para calcular o valor médio em cada medição. A terceira tela do programa representa as funções básicas de um osciloscópio digital, conforme a figura 4.8. Nesta tela se localiza o indicador de progresso das medições e das pressões, que serve para mostrar em que etapa se encontra o ensaio. Para aquisição de cada média, deve-se apertar o botão “nova aquisição”. Quando os sinais estão sendo adquiridos, o botão fica opaco e desabilitado.

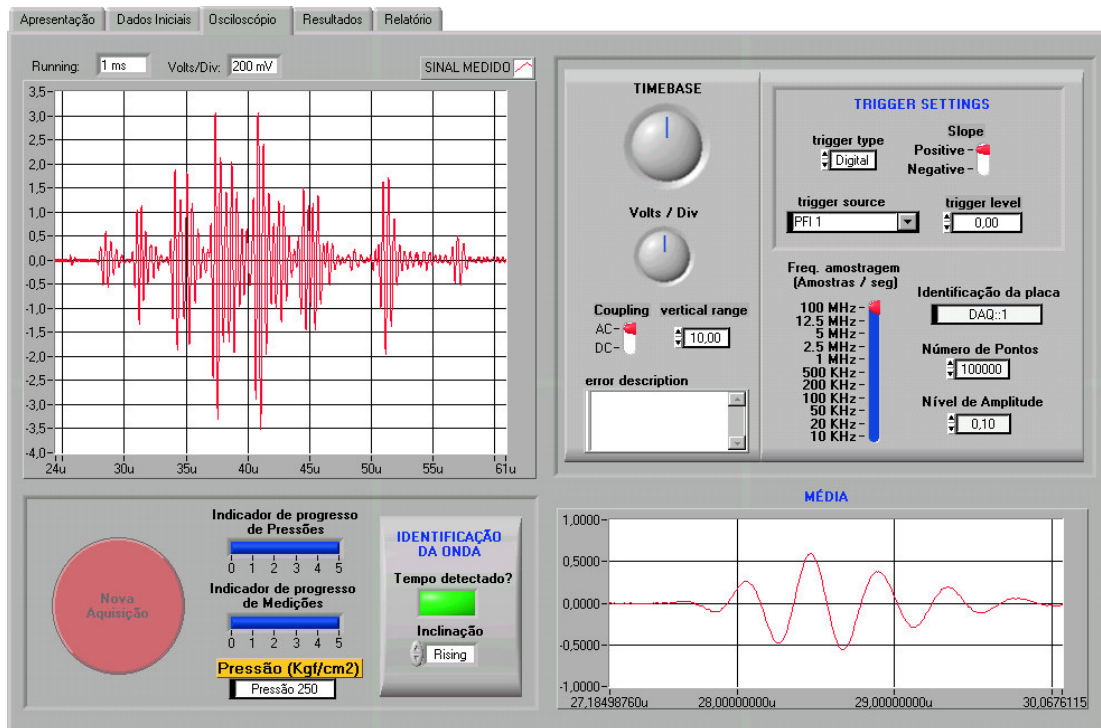


Figura 4.8: Tela do osciloscópio do programa de aquisição L-Stress.

O valor médio das aquisições, em nanosegundos, é apresentado na parte inferior direita do gráfico ampliado (onda média captada). O gráfico do lado esquerdo é geral e tem a função principal de verificar o nível de ruído e forma das ondas.

A quarta tela é referente aos resultados, sendo apresentada no final de todas as medições. Esta tela mostra as pressões aplicadas, medições feitas, tempos médios e as tensões reais calculadas para levantamento do gráfico e cálculo da constante acustoelástica, conforme a figura 4.9.

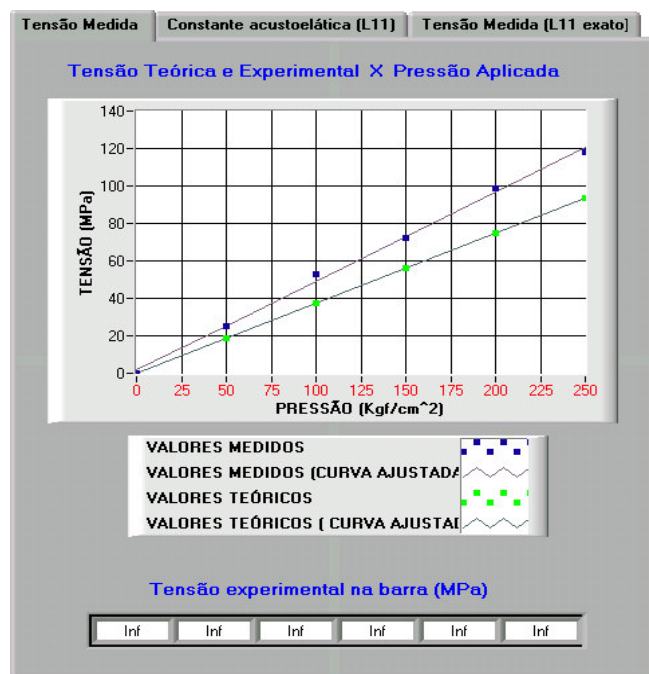


Figura 4.9: Tela de resultados do programa L-Stress.

A última tela do programa é referente ao relatório final, onde serão colocados todas as informações e resultados dos ensaios (Andrino 2002).

4.2.1 Exemplo de Determinação da Constante Acustoelástica

Na sequência, será mostrado o cálculo da constante acustoelástica da chapa 100140-1, com todas as etapas da fase experimental, bem como o cálculo do valor da constante acustoelástica da chapa. A determinação da constante apresenta as seguintes etapas:

- 1) Constantes usadas no cálculo, conforme tabela 4.4.

E(MPa)	2.07E+05
t*0	18938.1

Tabela 4.4: Constante referente ao tempo de percurso da onda com tensão nula.

2) Levantamento dos tempos de percurso da onda, em nanosegundos, em vários estágios de pressão, medida em bar, conforme tabela 4.5.

Pressão (bar)	0	100	200	300
1	28.581,46	28.594,57	28.613,22	28.633,55
2	28.586,36	28.594,45	28.615,73	28.631,50
3	28.586,86	28.602,35	28.618,86	28.633,00
4	28.579,57	28.599,27	28.612,80	28.632,89
5	28.584,35	28.593,1	28.613,20	28.632,84
Média	28.583,72	28.596,75	28.614,76	28.632,75
Desvio Padrão	0	0,004	0,004	0,01
Coeficiente de Variação	0	0,0000001	0,0000001	0,0000003

Tabela 4.5: Tempos de percurso da onda na chapa

3) Determinação do Δt (tabela 4.6) para os níveis de pressão de 100, 200 e 300 bar. O Δt é a diferença entre t e t_0 , onde:

t – tempo de percurso da onda para as pressões de 100, 200 e 300 bar;

t_0 – tempo de percurso da onda na chapa com pressão igual a zero, sem tensão ($t_0 = 28.583,72$).

Pressão (bar)	100	200	300
$t-t_0$	13,03	31,04	49,04

Tabela 4.6: Diferença dos nanosegundos de percurso em relação ao tempo de referência.

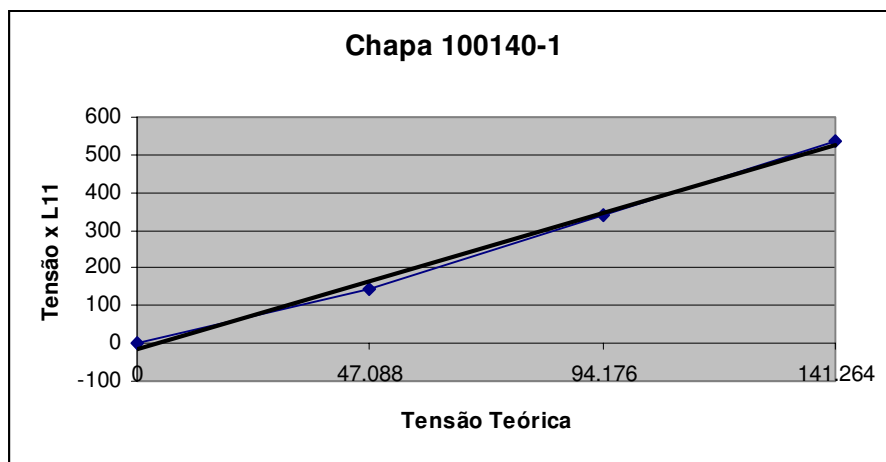
4) Com as constantes do item 1 e o Δt do item 3, se calculou o produto tensão x L_{11} , com o auxílio da equação 4.5; a tensão teórica foi calculada levando-se em consideração a área dos pistões e a pressão. Os dados estão apresentados na tabela 4.7.

$$\sigma L_{11} = K \quad K = \frac{E}{t^*_{0}} \Delta t \quad (4.5)$$

Pressão	Tensão teórica	Tensão x L11
0	0	0
100	47,09	142,40
200	94,18	339,30
300	141,26	536,01

Tabela 4.7: Dados para levantamento do gráfico para determinar L_{11} .

5) Com os valores da tensão teórica e da tensão x L11, obteve-se o gráfico no qual o coeficiente angular da reta média corresponde ao valor da constante acustoelástica, conforme figura 4.10.



*Constante acustoelástica para esta barra = 3,83

Figura 4.10: Gráfico da constante acustoelástica para chapa 100140-1.

4.2.2 Determinação da Incerteza Associada ao Processo de Medição

Para melhor avaliar a precisão do processo de medição para a obtenção da constante acustoelástica (L_{11}), pode-se calcular a incerteza associada à medição. Segundo Link (1997), a incerteza é sempre calculada para um intervalo de confiança de 95%. Existem dois tipos de incertezas no processo de medição, denominadas de “A” e “B”. A incerteza do tipo “A” está associada a dispersão das medidas encontradas, sendo expressa pela equação 4.7.

$$I_A = \frac{\pm t_{(95\%)}(n-1)\sigma_p}{\sqrt{n}} \quad (4.7)$$

Onde:

I_A – Incerteza do tipo “A”;

$t_{(95\%)}$ – Coeficiente tabelado pela função “t Student” para intervalo de 95% com “n” amostras;

n – Número de amostras (valores medidos);

σ_p - Desvio padrão da amostra.

A incerteza do tipo “B” está associada a fatores externos ao processo de medição, e não foi considerada neste trabalho. Quando o processo apresenta mais de um tipo de incerteza, a incerteza final é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas, conforme equação 4.8.

$$I_{Total} = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (4.8)$$

4.3 Determinação do Tempo de Referência (t_0) para as Rodas Ferroviárias

Para determinação do tempo de referência t_0 para as rodas, foi cortado o aro de duas rodas na direção radial em 12 partes iguais, conforme figura 4.11.



Figura 4.11: Peça de roda para determinar t_0 .

Os pedaços de rodas passaram pelo processo de alívio de tensões para garantir uma tensão residual próxima de zero, pois o tempo de referência é o tempo de percurso da onda no material livre de tensões. O processo de alívio de tensões foi efetuado conforme:

- Tempo de residência no forno: 5 horas (por pedaço);
- Temperatura: 250 °C.

O tempo de referência t_0 foi medido em cada pedaço no aro interno usando as ondas L_{cr} e o programa de aquisição L-Stress. O tempo de referência t_0 é o tempo de percurso da onda, em nanosegundos, entre o cabeçote emissor e o receptor, usando-se o mesmo dispositivo de fixação da figura 4.5, o qual mantém uma distância de 112 mm entre os cabeçotes. Foram feitas 5 medições em cada pedaço, calculada a média de cada pedaço e depois a média geral dos 24 pedaços (12 por roda), que foi adotada como t_0 de referência para cálculo das tensões nas rodas.

4.4 Determinação da Tensão Residual nas Rodas com Ondas L_{cr}

A tensão residual nas rodas foi calculada usando o mesmo método para determinação da constante acustoelástica e o mesmo programa de aquisição L-Stress.

a) Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova usados para este ensaio foram as rodas ferroviárias forjadas, classe C. O tempo de percurso da onda foi medido no aro interno e externo de 10 rodas D38, do mesmo tipo e da mesma corrida da qual foram retiradas as chapas para execução dos corpos-de-prova usados na determinação da constante acustoelástica. Este tipo de roda é usado no Brasil na Companhia Vale do Rio Doce, nos vagões para transporte de minério da Estrada de Ferro Carajás.

b) Bancada de Teste

Para medição do tempo de percurso da onda nas rodas foi usado o mesmo dispositivo da constante acustoelástica, ou seja, dois cabeçotes de ondas longitudinais fixados em uma sapata de acrílico separados à distância de 112 mm. Para manter a pressão constante nos cabeçotes, foi usada uma célula de carga com a mesma força de aplicação. Foi construído um gabarito em fenolite para controlar o posicionamento dos cabeçotes na roda, sendo o mesmo posicionado ponto a ponto a uma distância fixa em relação ao diâmetro interno do disco da roda, por meio de uma escala. A figura 4.12 (a) mostra o ensaio da roda e a figura 4.12 (b) mostra a célula de carga.

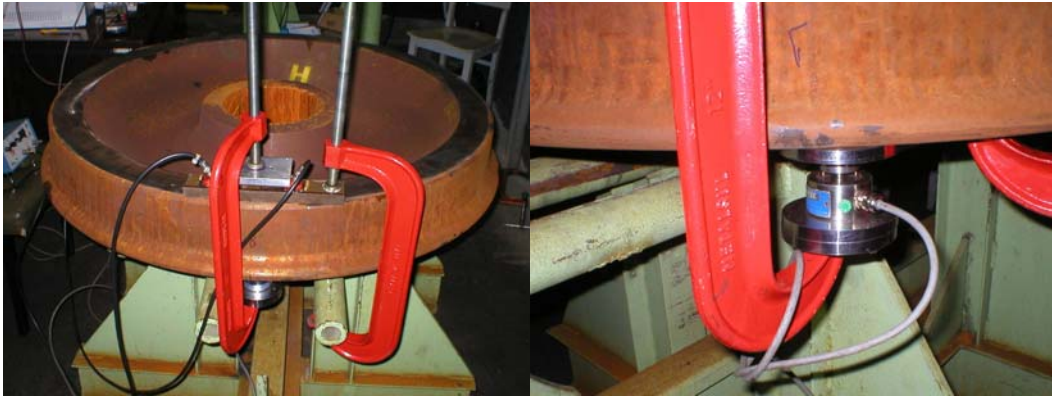


Figura 4.12 a: Ensaio da roda

Figura 4.12 b: Célula de carga

c) Método de Ensaio

A metodologia empregada para o cálculo das tensões residuais nas rodas foi a mesma da constante acustoelástica, pois se utilizou as mesmas equações. Os cabeçotes foram colocados nos aros interno e externo da roda e o programa L-Stress fez a aquisição do tempo de percurso da onda. Com o valor da constante acustoelástica do material (L_{11}), e o tempo de referência t_0 levantado nas chapas, usou-se a equação 4.3, conforme segue:

$$\sigma = \frac{E}{L_{11} t_0^*} \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta t = t - t_0 \quad (4.3)$$

Com o tempo (t) em nanosegundos para cada ensaio, tornou-se possível calcular a tensão residual da roda em cada ponto, considerando como tensão final em cada face a média aritmética de todos os pontos da face.

d) Programa de Aquisição de Dados

O programa utilizado foi L-Stress; porém, na segunda tela do programa deve ser colocado o valor da constante acustoelástica L_{11} e do tempo de referência (t_0), para que o programa execute o cálculo das tensões em cada ponto da roda. As telas para aquisição, cálculos e relatórios foram as mesmas usadas para determinação da constante acustoelástica já descrita no item 4.2, letra “d”.

4.5 Resumo do Planejamento Experimental

Os ensaios foram planejados em termos de quantidade de amostras, quantidade de pontos a serem medidos e frequência de medição em cada ponto, conforme a tabela 4.8.

Tipo de Ensaio	Número de Amostras	Número de Pontos por Amostra	Número de Medidas por Ponto	Total de Pontos Medidos
Constante Acustoelástica	8	4	5	160
Tempo de Referência (t_0)	12	1	5	60
Tensão nas Rodas	10	16 (8 lado interno) (8 lado externo)	5	800

Tabela 4.8: Planejamento experimental.

A quantidade de amostras e a frequência de medição foram obtidas por experiências similares anteriores, feitas no Laboratório de Acustoelástica da UNICAMP.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo são mostrados os resultados da parte experimental, com o levantamento da constante acustoelástica, levantamento do tempo de referência t_0 e a medição das tensões no aro das rodas ferroviárias nos lados interno e externo, pelo método das ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}).

5.1 Constante Acustoelástica

Para determinar a constante acustoelástica foram utilizadas 8 chapas cortadas do aro interno de duas rodas, conforme processo descrito no capítulo 4. As chapas foram retiradas das rodas de número 100140 e 100137. As chapas foram numeradas seguindo a numeração original das rodas, acrescentando-se os índices de 1 a 4 para identificar as chapas individualmente, conforme exemplo:

- Chapa 100140-1: Primeira chapa (índice 1) extraída da roda número 100140;
- Chapa 100137-2: Segunda chapa (índice 2) extraída da roda número 100137.

A tabela 5.1 mostra os valores das constantes acustoelástica e o coeficiente de correlação linear (r) das oito chapas ensaiadas. O coeficiente de correlação linear varia de +1 até -1, onde +1 significa uma correlação linear positiva perfeita e -1 uma correlação linear negativa perfeita. Os valores intermediários indicam a tendência forte ou fraca de correlação. Como pode-se observar

na tabela 5.1, todas as retas levantadas para determinação da constante acustoelástica apresentam o coeficiente maior que 0,9, indicando uma tendência muito forte de reta positiva em todos os casos. Isto mostra a consistência dos dados obtidos experimentalmente para o cálculo da constante acustoelástica. Estes valores serão comparados com aqueles encontrados na literatura, bem como analisados estatisticamente para verificação da validade do método.

CHAPA	CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA (L ₁₁)	CORRELAÇÃO LINEAR - r
100140-1	3,83	0,99
100140-2	3,69	0,98
100140-3	3,35	0,96
100140-4	3,46	0,97
100137-1	3,90	0,93
100137-2	3,78	0,99
100137-3	3,37	0,96
100137-4	3,36	0,94
Média	3,59	-
Desvio Padrão	0,23	-
Coefficiente de Variação	0,06	-

Tabela 5.1: Valores das constantes acustoelásticas e correlação linear.

A figura 5.1 mostra a variação das constantes acustoelásticas em torno da média para as oito chapas ensaiadas, com intervalo de confiança de 95%.

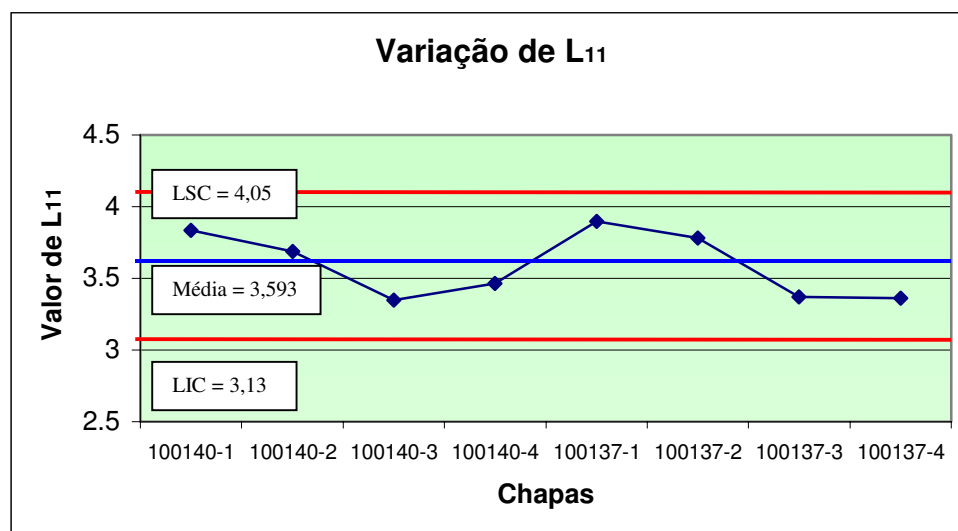


Figura 5.1 – Variação de L₁₁ em torno da média.

Pelo gráfico de variação de L_{11} em torno da média, pode-se afirmar com 95% de confiança que a constante acustoelástica situa-se entre 3,75 e 3,43.

Fukuoka et al., (1985) levantou as constantes acustoelásticas de rodas ferroviárias forjadas com composição química similar à classe B da AAR, pelo método da birrefringência. Embora os valores não possam ser comparados quanto à grandeza por se tratarem de métodos diferentes, estatisticamente pode-se afirmar que o desvio padrão foi de 0,27 em 40 amostras, portanto pode-se afirmar que a constante levantada pelo método das ondas L_{cr} é consistente, com variações dentro das faixas normais para este tipo de ensaio, conforme mostra a tabela 5.1, na qual o desvio padrão foi de 0,23.

Pela revisão bibliográfica (Hauk et al., 1997), a constante acustoelástica do aço de trilho ferroviário é 2,9, porém, o aço de trilho ferroviário apresenta uma composição química diferente da roda ferroviária, com faixa de carbono maior e com direção de laminação diferente da roda.

Outros ensaios, descritos na revisão bibliográfica, usaram o método da birrefringência cujo valor da constante acustoelástica não pode ser comparado com o das ondas L_{cr} . No método da birrefringência, a constante acustoelástica é obtida ao longo do volume do aro da roda, ao contrário das ondas L_{cr} , cuja constante é obtida por ondas sub-superficiais (Tanala et al., 1995).

Conforme as equações do item 4.2.2 do capítulo 4, o valor da incerteza do processo de medição da constante acustoelástica, para um intervalo de 95% de confiança, é calculado conforme segue:

$$I_A = \frac{\pm 2,36 * 0,2318}{\sqrt{8}}$$

$$I_A = \pm 0,193$$

5.2 Tempo de Referência (t_0)

O tempo de referência foi obtido medindo-se o tempo de percurso da onda em 24 fatias de rodas, conforme descrito no capítulo 4. A tabela 5.2 mostra os valores médios obtidos para cada ponto, além da média final.

RODA 1 (Fatia)	TEMPO (nanosegundos)	RODA 2 (Fatia)	TEMPO (nanosegundos)
1	28536,87	1	28529,79
2	28539,14	2	28536,39
3	28543,49	3	28539,07
4	28535,15	4	28533,12
5	28535,93	5	28539,09
6	28540,49	6	28537,56
7	28532,89	7	28527,86
8	28533,33	8	28534,4
9	28534,50	9	28538,05
10	28534,64	10	28534,00
11	28533,33	11	28532,58
12	28545,88	12	28536,70
Média	28536,01		
Desvio Padrão	4,02		
Coefficiente de Variação	0,00014		

Tabela 5.2: Valores dos tempos de referência t_0 .

Pela estatística pode-se afirmar, com 95% de confiança, que o tempo de referência (t_0) estará entre 28537,67 e 28534,35 nanosegundos.

O tempo de referência t_0 , utilizado para o cálculo das tensões nas rodas, foi a média de todos os pontos (28.536,01 nanosegundos). Não foi possível comparar o valor encontrado com outros relatados na literatura, pelo fato de os tempos de referência terem sido determinados pelo método da birrefringência. Os valores são completamente diferentes, além do fato de que os transdutores são diferentes.

A incerteza de medição do tempo de referência t_0 pode ser determinada pela composição de duas incertezas. A primeira, com relação ao máximo desvio padrão encontrado nos pedaços de roda avaliados (valor de 3,08 nanosegundos), e a segunda como sendo o desvio padrão geral de

todas as medidas dada pela tabela 5.2 (valor de 4,02 nanosegundos). O valor da incerteza foi calculado conforme:

$$I = \sqrt{3,08^2 + 4,0153^2}$$

$$I = 5,06 \text{ ns}$$

A variação da repetibilidade da tensão em cada ponto pode ser determinada pela equação 5.1.

$$\Delta\sigma = \frac{E}{L_{11}t_0^*} \Delta t \quad (5.1)$$

Onde:

$\Delta\sigma$ - Variação da tensão em cada ponto em MPa;

E- Módulo de elasticidade (2,07E+05) MPa;

L_{11} - Constante acustoelástica (3,59);

t_0^* – Tempo de referência (18938,10) nanosegundos;

Δt - Variação do tempo de percurso da onda, ou seja a incerteza do tempo (5,06) nanosegundos.

O valor da variação da repetibilidade em cada ponto ($\Delta\sigma$) foi de 15,41 MPa.

A incerteza total de medição do processo em relação à variação da tensão pode ser calculada pela equação 5.2, partindo da equação 5.1, derivando-se parcialmente cada fator que interfere na incerteza.

$$I_t = \sqrt{\left(\frac{\delta\Delta t}{\delta L_{11}} I_{L_{11}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta t}{\delta\Delta t} I_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta t}{\delta E} I_E\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta t}{\delta t_0^*} I_{t_0^*}\right)^2} \quad (5.2)$$

A equação derivada (5.3) tem a variação, com relação ao módulo de elasticidade, nula. Assim:

$$I_t = \sqrt{\left(\frac{-E}{L_{11}t_0^*} \Delta t I_{L_{11}}\right)^2 + \left(\frac{E}{L_{11}t_0^*} I_{\Delta t}\right)^2 + 0 + \left(\frac{-E}{L_{11}t_0^*} \Delta t I_{t_0^*}\right)^2} \quad (5.3)$$

A incerteza referente ao módulo de elasticidade é nula porque a variação é muito pequena, os demais termos são definidos por:

I_t - Incerteza total do processo;

E – Módulo de elasticidade (2,07E05) MPa;

L_{11} - Constante acustoelástica (3,593);

t_0^* - Tempo de referência (18938,10) nanosegundos;

Δt - Variação do tempo de percurso da onda – incerteza (5,06) nanosegundos;

$I_{L_{11}}$ - Incerteza referente a constante acustoelástica (0,193);

$I_{\Delta t}$ - Incerteza do tempo (5,06) nanosegundos;

$I_{t_0^*}$ - Incerteza quanto ao tempo de referência (4,02) nanosegundos.

O valor final da incerteza fica:

$I_t = 15,4$ MPa

5.3 Valores das Tensões nas Rodas

As tensões foram medidas em 10 rodas, corresponde a 8 pontos no lado interno e 8 pontos no externo, conforme descrito no capítulo 4. As figuras 5.2 até 5.11, mostram os valores médios de tensão nos pontos do aro interno e externo de cada roda. Estes gráficos permitem a avaliação das tensões superficiais em cada ponto e a comparação com a tensão no mesmo ponto do lado oposto, bem como avaliar a variação das tensões ao longo do aro interno e externo de cada roda. As tensões do lado externo do aro das rodas foram medidas usando as características do lado interno (tempo de referência – t_0 , constante acustoelástica – L_{11}); logo estes valores servem apenas para verificar a estabilidade do processo.

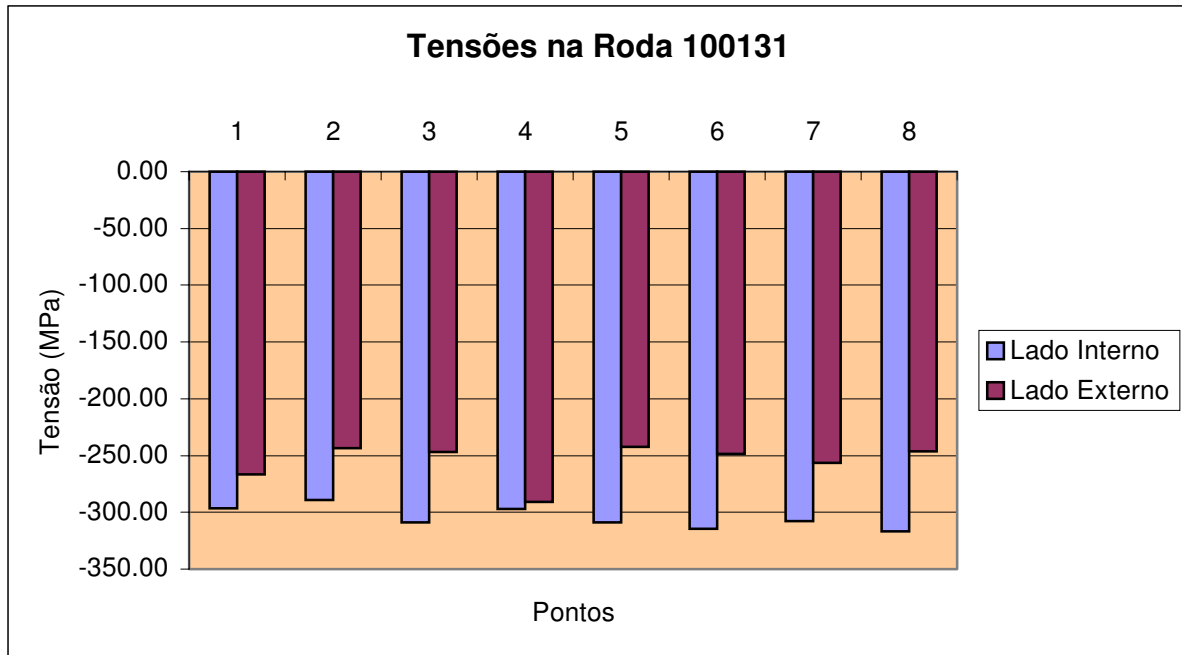


Figura 5.2: Tensões no aro interno e externo da roda 100131.

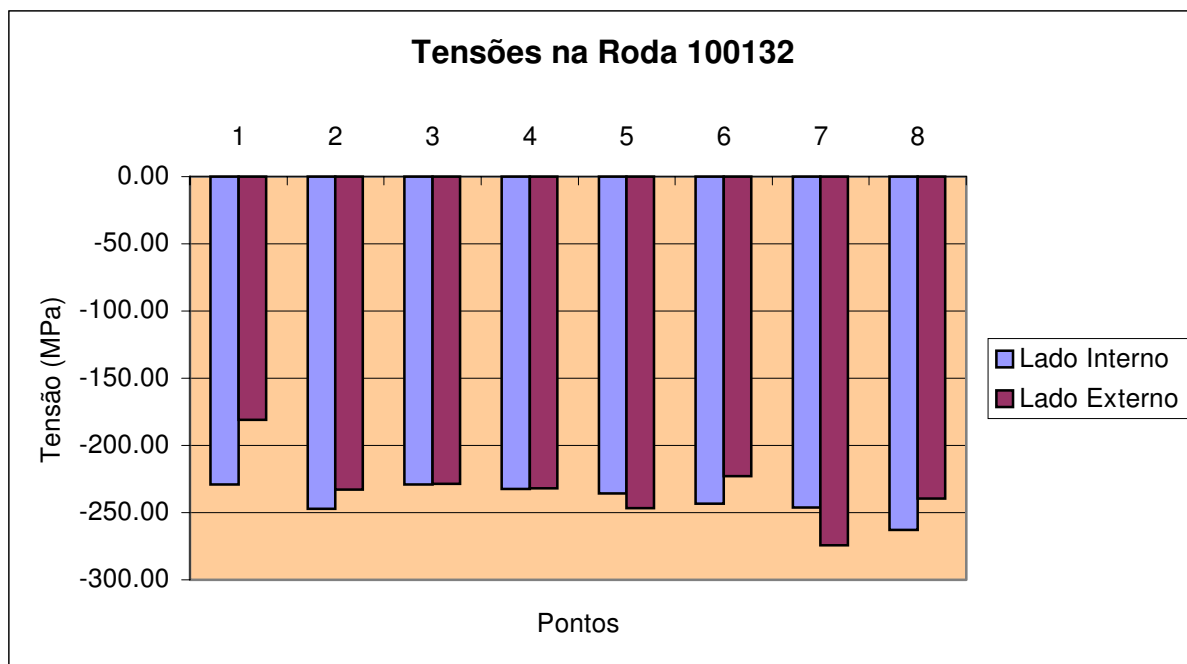


Figura 5.3: Tensões no aro interno e externo da roda 100132.

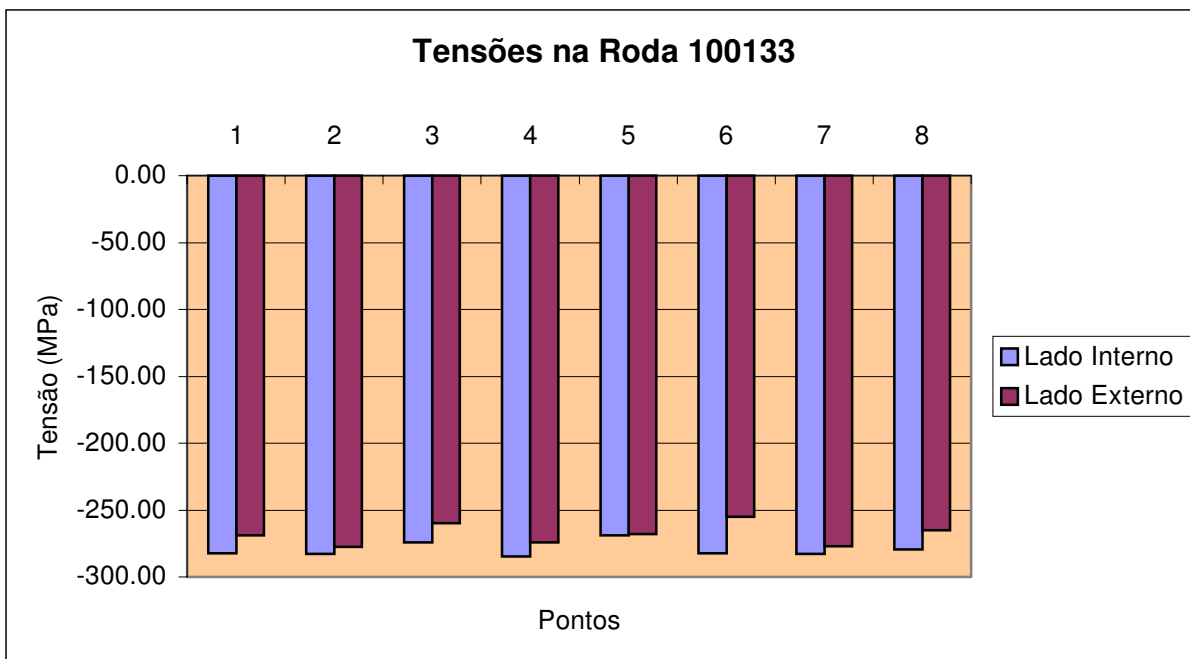


Figura 5.4: Tensões no aro interno e externo da roda 100133.

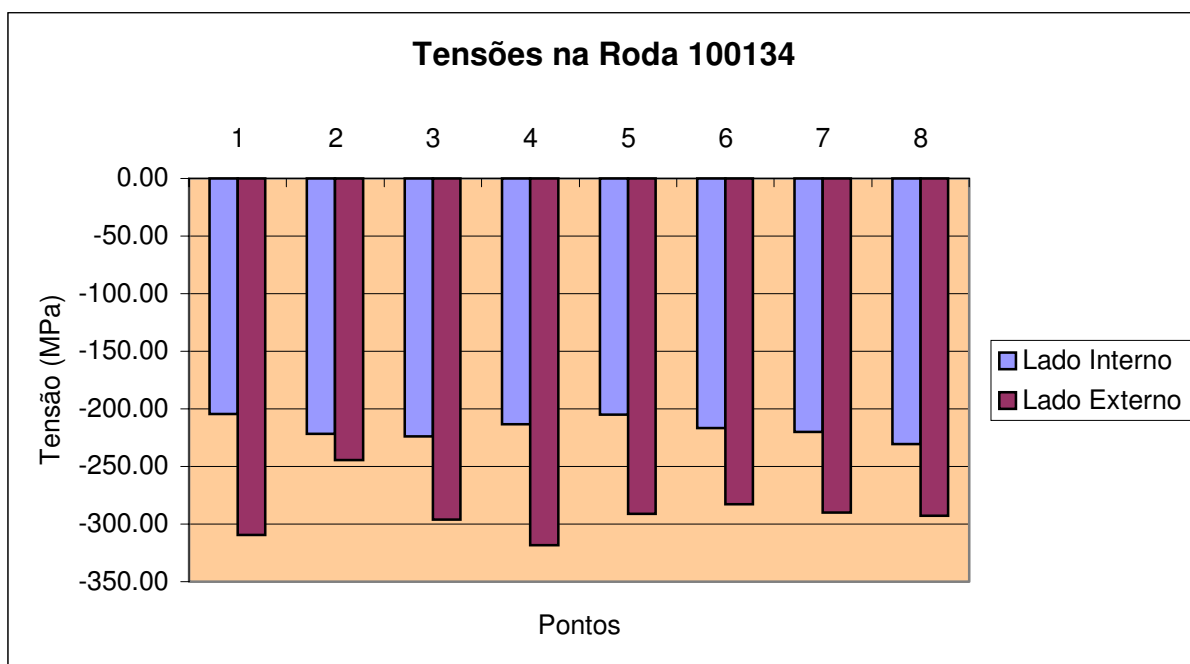


Figura 5.5: Tensões no aro interno e externo da roda 100134.

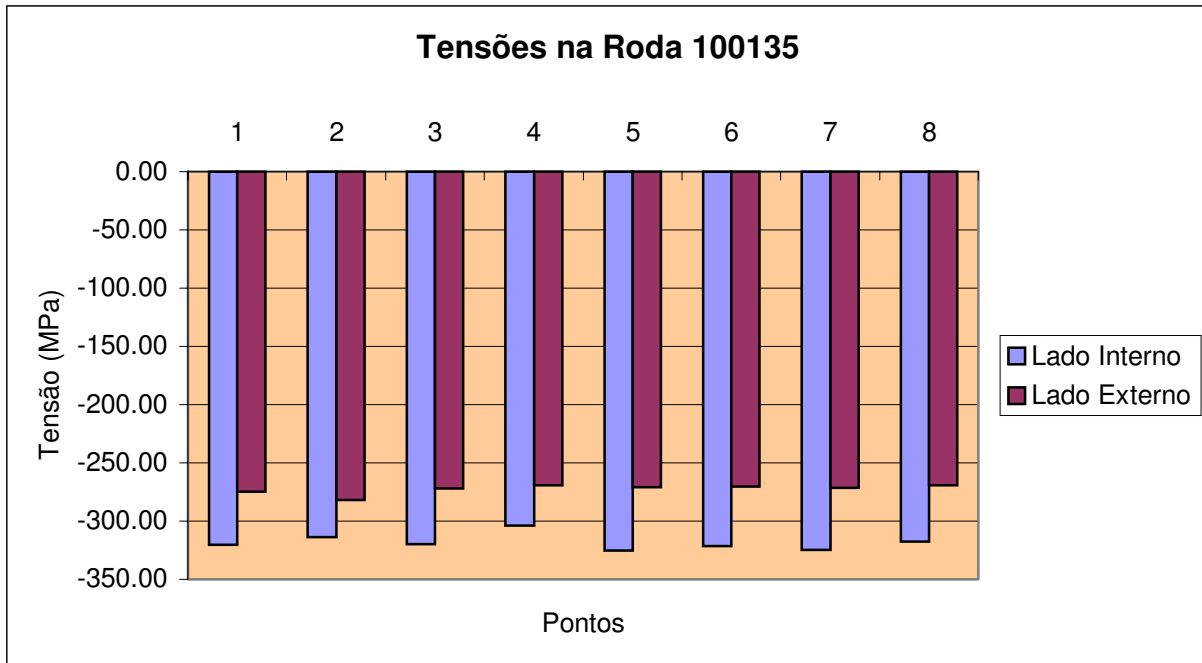


Figura 5.6: Tensões no aro interno e externo da roda 100135.

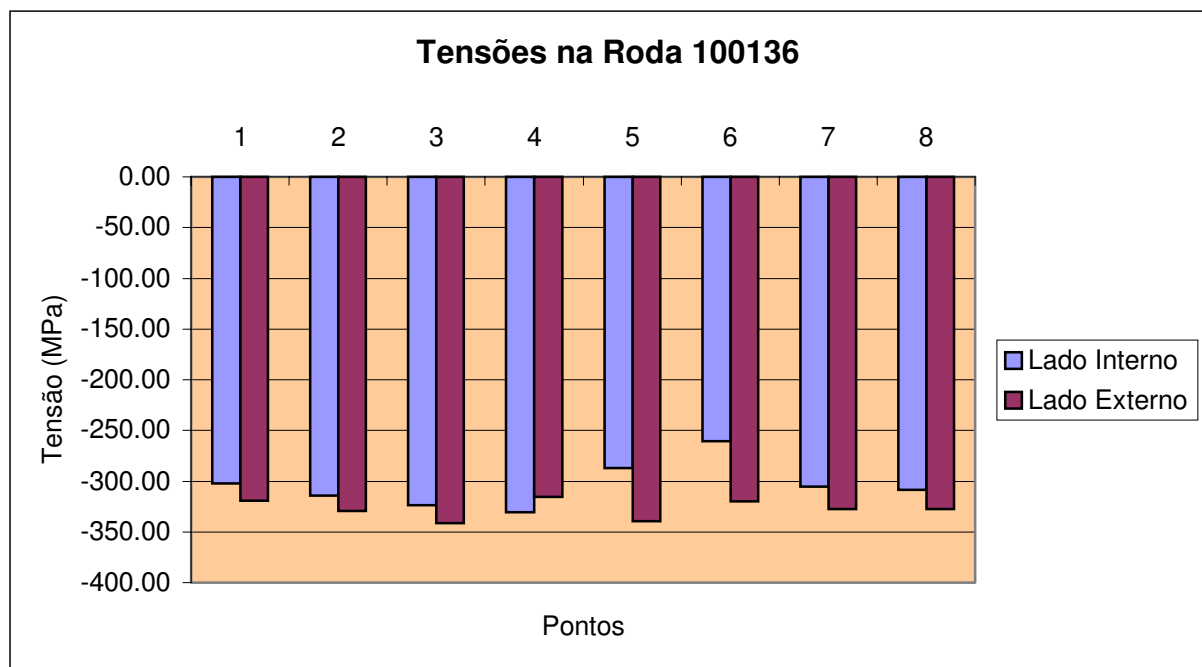


Figura 5.7: Tensões no aro interno e externo da roda 100136.

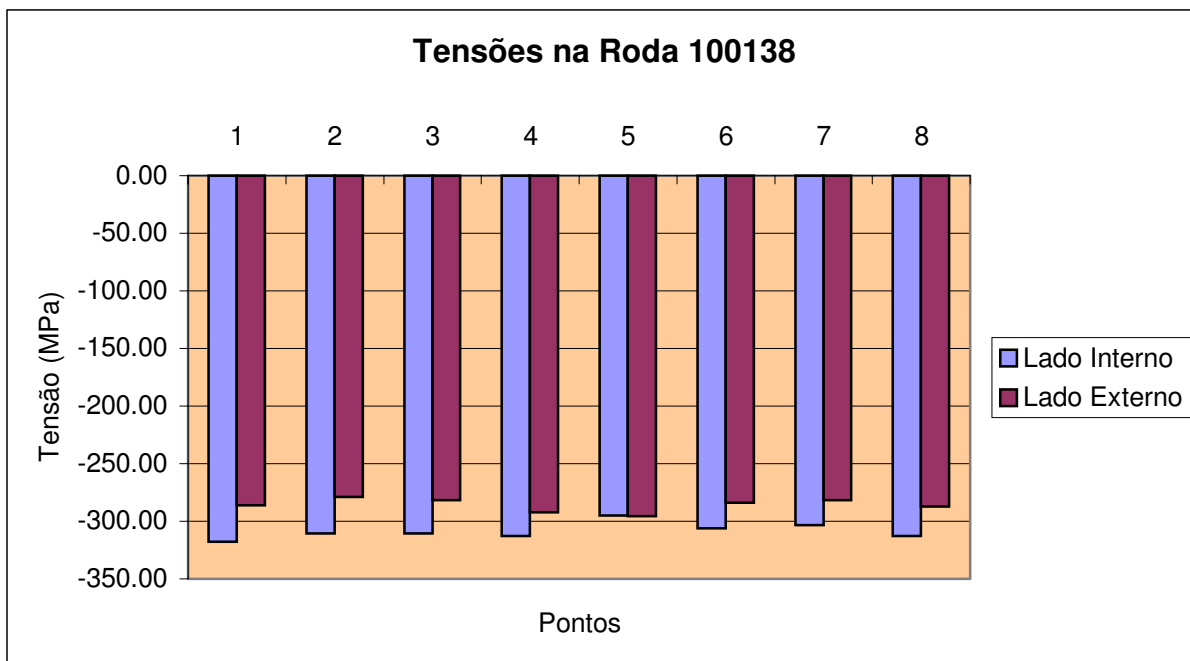


Figura 5.8: Tensões no aro interno e externo da roda 100138.

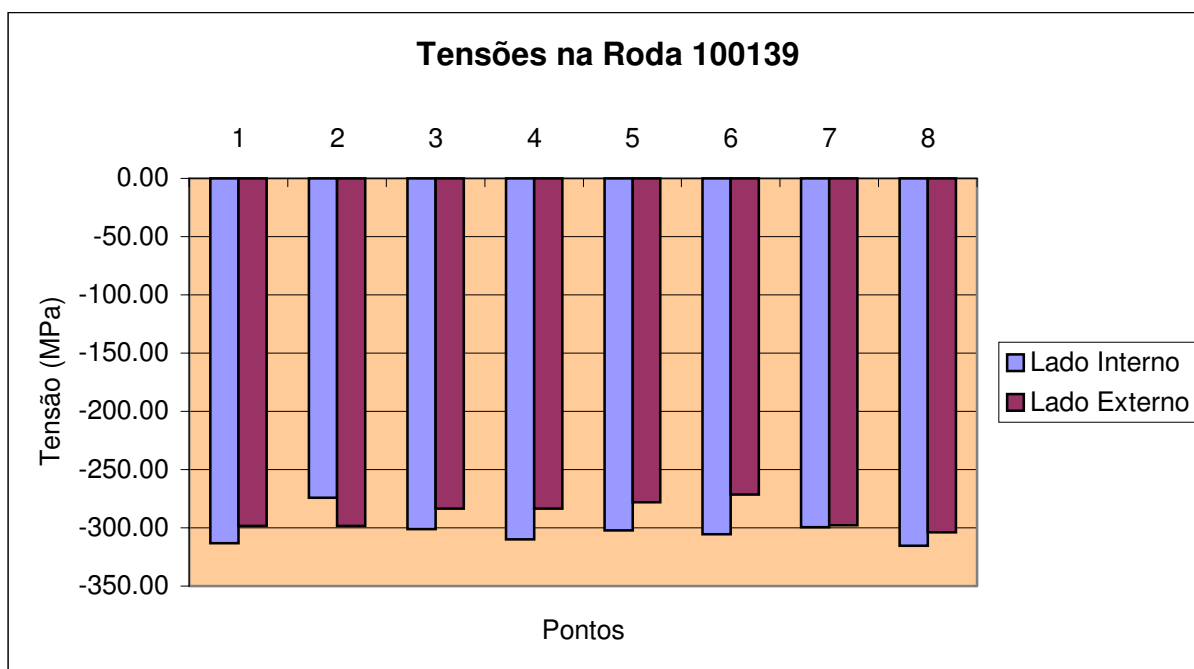


Figura 5.9: Tensões no aro interno e externo da roda 100139.

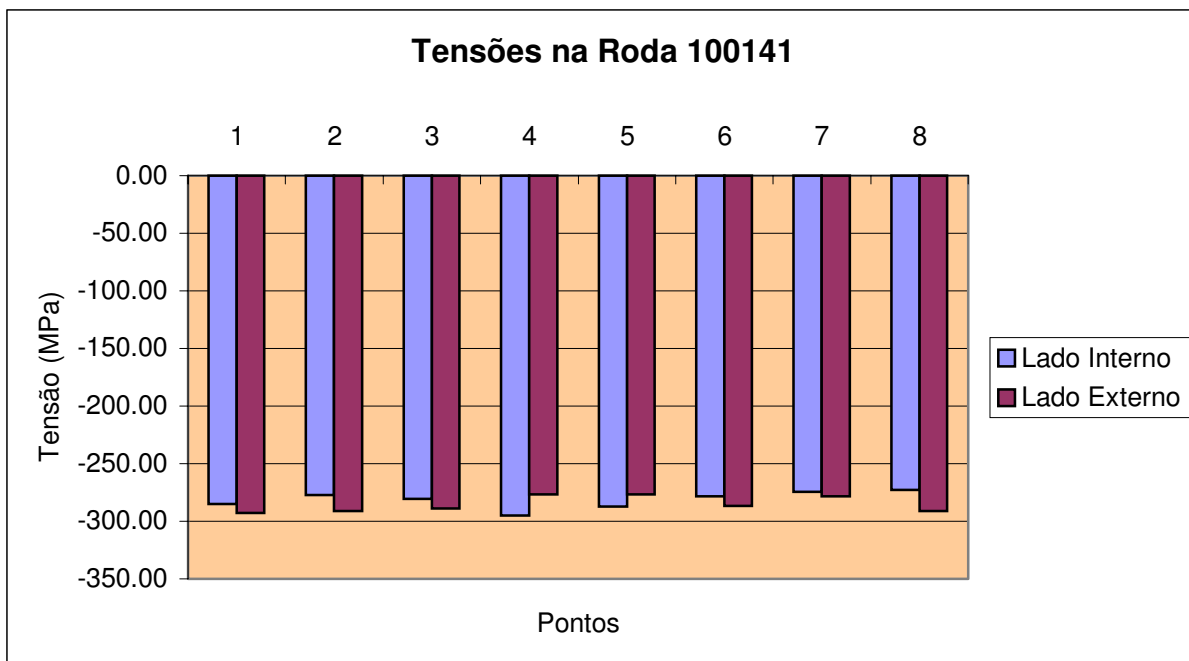


Figura 5.10: Tensões no aro interno e externo da roda 100141.

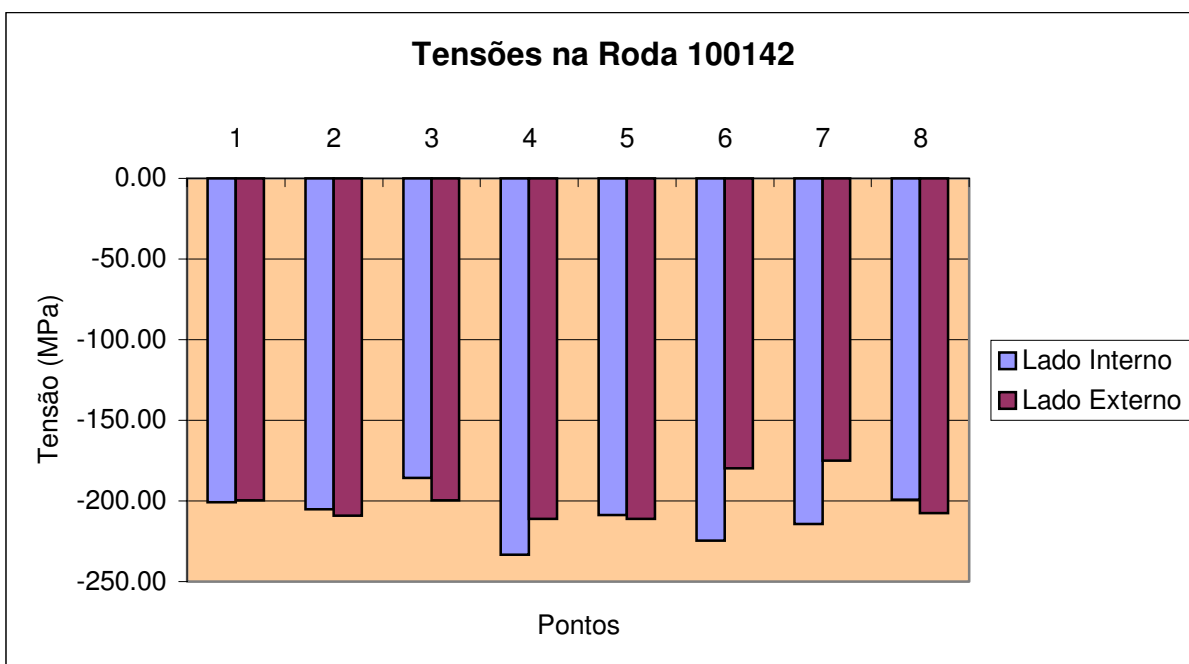


Figura 5.11: Tensões no aro interno e externo da roda 100142.

A tabela 5.3 mostra a média final das tensões e dos tempos de percurso das ondas nos oito pontos medidos de todas as rodas nos aros interno e externo.

RODA	LADO INTERNO		LADO EXTERNO	
	TEMPO (nanosegundos)	TENSÃO (MPa)	TEMPO (nanosegundos)	TENSÃO (MPa)
100131	28435,78	-304,73	28452,10	-255,12
100132	28456,88	-240,99	28459,7	-232,41
100133	28444,06	-279,99	28447,85	-268,46
100134	28464,68	-219,15	28440,48	-290,88
100135	28431,37	-318,59	28446,40	-272,87
100136	28436,08	-303,82	28428,30	-327,47
100138	28435,00	-307,55	28442,0	-286,25
100139	28436,53	-302,89	28440,48	-290,44
100141	28443,59	-279,56	28442,23	-285,55
100142	28467,34	-209,17	28470,57	-199,34
Média	28445,13	-276,30	28447,01	-270,39
Desvio Padrão	13,13	39,92	11,67	35,37
Coefficiente de Variação	0,00046	-0,14	0,00041	-0,13

Tabela 5.3: Valores finais das tensões na rodas.

Pela estatística, com 95% de confiança, pode-se estimar o valor da tensão do lado interno da roda que estará entre $-301,04$ MPa e $-251,56$ MPa; para o lado externo estará entre $-292,31$ MPa e $-248,47$ MPa, com a ressalva de que estes últimos representam valores apenas indicativos.

A figura 5.12 mostra o resultado das tensões internas em cada roda, possibilitando comparar a magnitude dos valores das tensões em diversas rodas.

Analisando-se o gráfico, nota-se que a variação de tensão entre as rodas se deve à variação no processo de tratamento térmico, devido a não uniformidade de sobremetal da roda, visto que as rodas foram tratadas brutas e usinadas após o tratamento térmico (processo padrão para este tipo de roda).

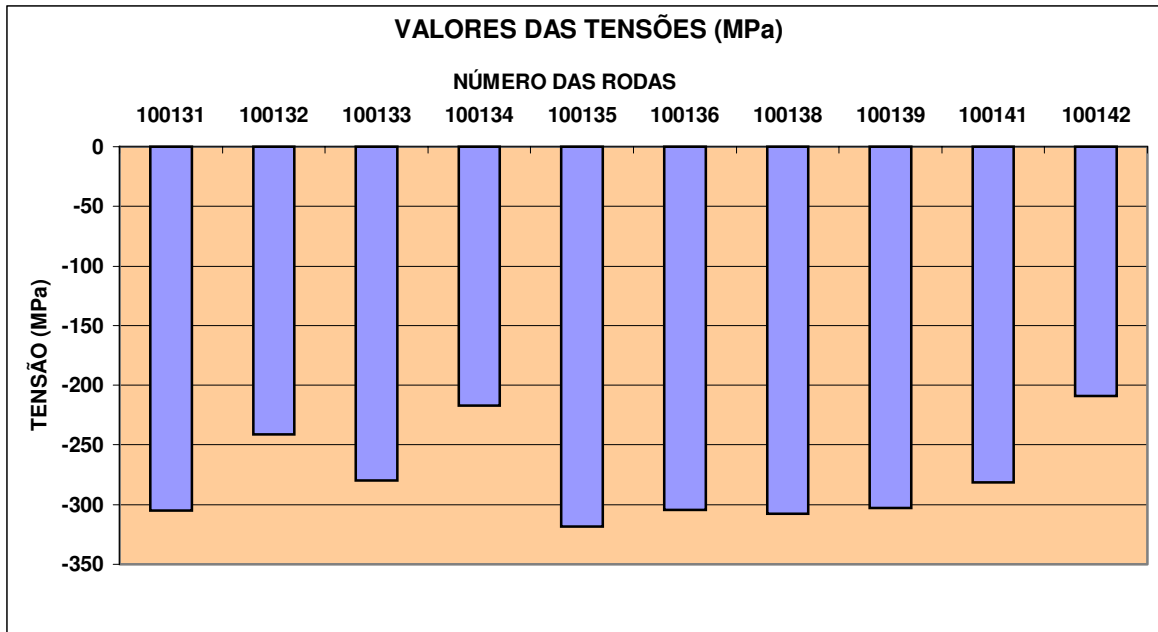


Figura 5.12: Gráfico comparativo das tensões do lado interno das rodas.

Segundo Schramm et al., (1995) a tensão residual em duas rodas fundidas, classe C, medidas com ondas longitudinais sub-superficiais no lado interno do aro, foi de -90 MPa e, no lado externo, de -140 MPa. Schramm mediu a tensão residual em dez rodas fundidas com o mesmo método obtendo uma tensão média de $-118,6$ MPa para o lado interno e $-120,5$ MPa para o externo, com um desvio padrão de $9,94$ MPa para o lado interno e $12,42$ MPa para o externo. A amplitude do lado interno foi de $-17,62$ MPa e do externo $-12,42$ MPa. Comparando os resultados obtidos nas rodas fundidas com os da forjada, observa-se uma dispersão menor nas primeiras devido ao fato de a roda fundida não ser usinada após o tratamento térmico, eliminando, desta forma, o efeito da remoção não uniforme de material em todos os pontos da face do aro interno e externo. A diferença de grandeza entre o valor da tensão superficial média em ambas as faces deve-se ao fato das diferenças de material e de estrutura metalográfica das rodas fundidas e forjadas (Stone, 2003), respondendo de forma diferente ao tratamento térmico.

Lonsdale et al., (2000) mediu as tensões de rodas novas, classe C, com cabeçotes piezoelétricos usando o método da birrefringência no aro externo das rodas de 42 in, 40 in, 36 in e 32 in, obtendo valores de -190 MPa a -39 MPa, com amplitude de tensão de 151 MPa, maior

do que o valor de 109,35 MPa (lado interno), encontrado no método das ondas L_{cr} (tabela 5.3). A mesma pesquisa simulou, por elementos finitos, as tensões em rodas novas chegando a um valor mínimo de -226,9 MPa no aro externo, próximo dos -270,39 MPa obtidos com as ondas L_{cr} . Demilly et al., (2001) repetiu os ensaios em rodas forjadas classe C, usando o mesmo método com cabeçotes eletromagnéticos; porém, as rodas foram aquecidas simulando o efeito da frenagem. Os valores obtidos foram de -222 MPa a -196 MPa, no aro externo. Levando-se em consideração que as rodas foram aquecidas provocando diminuição da tensão inicial de compressão e que o método empregado foi o da birrefringência, que se utiliza de ondas de volume obtendo uma tensão média ao longo da espessura do aro, os valores encontrados pelo método das ondas L_{cr} foram consistentes, pois variaram de -327,47 MPa a -198,97 MPa, sendo menores do que aqueles das rodas aquecidas. Durante o uso, o processo de frenagem das rodas, que leva ao aquecimento, faz com que as tensões iniciais de compressão diminuam, chegando a invertê-las para tração.

Gordon et al.,(1998) simularam, por elementos finitos, o fenômeno da inversão das tensões em rodas forjadas, considerando inicialmente as tensões de fabricação e depois as tensões devidas a frenagem e ao contato roda trilho. A tensão mínima para o aro interno da roda nova foi de -200 MPa; porém os autores não citaram a classe da roda considerada.

A simulação, em elementos finitos, do item 3.3 do capítulo 4 mostrou que a tensão residual na superfície do aro interno situa-se em torno de -212 MPa, na parte central, e faixa de -300 MPa, na vizinhança da parte central na direção da pista de rolamento. As tensões medidas pelas ondas L_{cr} apontaram valores de -276 MPa, em média, para o aro interno, mostrando coerência com os resultados da simulação em elementos finitos, mesmo considerando que esses são apenas indicativos. No lado externo a divergência foi significativa, devido ao fato de que todas as referências (t_0 e L_{11}) foram adotadas baseadas no aro interno, que recebe um esforço de laminação bem maior para a formação do friso. Esse fato pode influenciar bastante os valores da constante acustoelástica e do tempo de referência.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

Esta pesquisa mostrou que o novo método proposto, de avaliação de tensões por ultrassom, usando a técnica das ondas longitudinais criticamente refratadas na face interna do aro, é adequado para medir o nível de tensões residuais em rodas ferroviárias forjadas novas. Os equipamentos necessários para montar este ponto de inspeção são todos comerciais, possuindo um custo acessível para a implantação do sistema e a facilidade no uso da técnica. A consistência dos resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa estimula o uso deste tipo de ensaio em detrimento dos ensaios destrutivos empregados atualmente em larga escala por fabricantes de rodas e ferrovias para avaliar o nível de tensão nas rodas.

A execução deste tipo de ensaio nas rodas novas possibilita garantir um nível mínimo de tensão de compressão no processo de tratamento térmico, que garanta a um ciclo de vida da roda sem ocorrência de trincas e quebras em serviço provocando acidentes. O método das ondas L_{cr} pode ser usado também nas oficinas de manutenção para medição de tensões em rodas usadas, bastando determinar a constante acustoelástica do material e o tempo de referência t_0 . Este ensaio feito nas oficinas irá evitar de uso rodas que possuam uma tensão de tração que possa comprometer a segurança da composição. Segundo Lonsdale et al., (2000) as ferrovias da Europa que usam o sistema da birrefringência para determinar a tensão residual em rodas de vagão de carga, tem um limite de 350 MPa de tensão de tração para condenar a roda.

Faz-se necessário ressaltar que as tensões calculadas segundo este método consideraram um valor constante de L_{11} . Esse valor, conforme resultados apresentados no capítulo 5, apresenta variação de barra para barra, permitindo quantificar a dispersão do método. O valor encontrado para a constante acustoelástica para ondas longitudinais criticamente refratadas foi de 3,59, e a variação esperada definida pelo desvio padrão combinado (dispersão no ponto + dispersão nas barras) foi de 0,23. Com isso, uma variação combinada de 15,4 MPa pode ser esperada para a tensão. Este valor é cerca de 2% do limite de escoamento do material da roda. O método mostra, então, resultados precisos, o que confirma sua aplicação como alternativa viável para a determinação de tensões em comparação com os métodos usuais.

O êxito no uso das ondas L_{cr} , para avaliação de tensões em rodas ferroviárias forjadas novas, abre um leque amplo para continuação desta linha de pesquisa em trabalhos futuros. Uma primeira possibilidade seria o emprego da metodologia para avaliação das tensões em rodas usadas, podendo-se usar um sistema de aquecimento da pista de rolamento para simular o efeito da frenagem com diversos níveis de potência. Este aquecimento irá diminuir a tensão residual de compressão podendo atingir o ponto da inversão para tração. Este prolongamento da pesquisa irá avaliar a sensibilidade das ondas L_{cr} em rodas usadas, e possibilitar o uso da técnica nas rodas usadas, em inspeções regulares de manutenção das composições.

As rodas aquecidas ou usadas, com as tensões medidas pelo método das ondas L_{cr} , poderiam ser destruídas (cortadas) e avaliadas suas tensões pelo método do ensaio de fechamento. A comparação de resultados entre os dois métodos seria de muita valia para detectar as divergências de resultados entre eles. Em continuação, poderia ser verificado se existe uma relação matemática, que relacione tensão residual no ensaio de fechamento com a abertura ou fechamento da roda após o corte.

A técnica mais empregada atualmente para medição de tensões em rodas ferroviárias por ultra-som é a birrefringência. Esta pesquisa poderia continuar com a avaliação das tensões nas rodas por este método e comparar os resultados com o das ondas L_{cr} . Isto possibilitaria verificar a precisão das duas técnicas e fazer uma terceira comparação com o método destrutivo (corte) descrito no parágrafo anterior.

A simulação de tensões em elementos finitos é muito usada na área ferroviária. A AAR exige uma simulação em elementos finitos de toda roda oriunda de projeto novo que deverá ser submetido ao Comitê da AAR para sua aprovação, antes de ser fabricada e colocada em uso (AAR, 1994). Uma outra extensão desta pesquisa seria simular as tensões residuais originadas no tratamento térmico, em elementos finitos, e comparar o resultado com a técnica das ondas L_{cr} . Este estudo serviria para refinar os modelos em elementos finitos aproximando seus resultados ainda mais da realidade.

O material da roda não é isotrópico, embora esta aproximação tenha sido usada nesta pesquisa e em toda literatura disponível sobre o assunto. Esta linha de pesquisa poderia avançar no sentido de modelar matematicamente o cálculo das tensões por ultra-som, admitindo ser o material anisotrópico. Desta forma, o efeito desta simplificação poderia ser avaliado no resultado final.

Para continuidade desta linha de pesquisa todo o trabalho poderia ser aplicado para as rodas fundidas e verificar o nível de sensibilidade do método para rodas, fabricadas por um processo diferente. Tem sido reportada grande dificuldade no emprego do método da birrefringência para esse tipo de roda, devido a não uniformidade da estrutura do material ao longo do caminho da onda cisalhante. Um método como o apresentado neste trabalho não seria afetado pelo efeito dessa não uniformidade.

Referências Bibliográficas

- Andrino, M. H., Caetano, S. F., Santos Júnior, A. A., Trevisan, R. E. Sistema Automático para Determinação de Tensões Mecânicas em Chapas Metálicas Baseado na Teoria Acustoelástica. *Laboratório de Acustoelástica da Universidade de Campinas*, 2002, Campinas.
- Association of American Railroads, Washington. Section G; referências bibliográficas. Washington, 1994, 100p.
- Aruta, L., Sarti, M., Torrini, E. The evolution of non destructive tests on railway wheels. *Proceedings of 3° International Wheelset Congress*, 9, 2001, Rome.
- Bentahar, M. Second and third order elastic constants determination an isotropic metal. *Proceedings of 15° WCNDT*, 2000, Rome.
- Bittencourt, Marcelo de S. Q. ; Lamy, Carlos A. ; Santos Júnior, Auteliano A. ; Payão Filho, João C. ; Bray, Don E. Ultrasonic techniques and their application in Brasil: reality and perspectives. In: 6° NDE Topical Conference, ASME, 1999, v.19.
- Bouda, Badidi A., Benchaala, A., Alem, K. Ultrasonic characterization of materials hardness. *Elsevier Ultrasonics*, v.38, pp. 224 – 227, 2000.
- Bray, Don E. Current directions of ultrasonic stress measurement techniques. *Proceedings of 15° WCNDT*, 2000, Rome.

- Bray, Don E., Salamanca, Leon T. Zero – force travel – time parameters for ultrasonic head – waves in railroad rail. *Materials Evaluation*, v.43, No. 7, pp. 854 – 858, June 1985.
- Bray, Don E. Ultrasonic stress measurement with the Lcr technique. *NDTnet*, July 24, 1998.
- Castello Branco, J. E., Ferreira, R., *Tratado de estradas de ferro*. 1ed. Reading: Minicucci, D. J., 2000, Cap. 1.3, Rodeiros, pp. 183-192.
- Clark, A. V., Hehman, C. S., Gallagher, D., Lozev, M. G., Fuchs, P. A. Ultrasonic measurement of stress in pin and hanger connections. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v.18, No. 3, pp. 103 – 113, 1999.
- Demilly, F., Lonsdale C., McCabe T., Del Fabbro V., Vallart E., Caldwell B. Wheel rim residual stress measurement using ultrasonic testing. *Proceedings of 3^o International Wheelset Congress*, 9, 2001, Rome.
- Dieter, G. E., *Engineering design materials and processing approach*, McGraw Hill, 1983, chapter 7, pp. 252-260.
- Dorfi, H. R.; Busby H. R. Ultrasonic Stress Measurement Based on the Generalized Acoustic Ratio Technique. *J. Solids Structures*, v33, n8, pp. 1157-1174, 1996.
- Duquennoy, M., Ouaftouh, M., Ourak, M. Ultrasonic evaluation of stress in orthotropic materials using Rayleigh waves. *Elsevier NDT&E International*, v.32, pp. 189 – 199, 1999.
- Duquennoy, M., Ouaftouh, M., Ourak, M., Jenot F. Theoretical determination of Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values. *Elsevier Ultrasonics*, v.39, pp. 575 – 583, 2002.

- Egle, D. M., Bray D. E. Measurement of acoustoelastic and third – order elastic constants for rail steel. *Journal of Acoustic Society of America*, v.60, pp. 741 – 744, september 1976.
- Egle, D. M., Bray D. E. Application or the acousto – elastic effect to rail stress measurement. *Materials Evaluation*, pp. 41 – 44, march 1979.
- Egle, D. M., Bray D. E. Ultrasonic studies of anisotropy in cold – worked layer of used rail. *Metal Science*, v.15, pp. 574 – 582, november – december 1981.
- European Standard, Brussels. EN 13262; referências bibliográficas. Brussels, 2000, 40p.
- Fukoka H., Toda H., Hirakawa K., Sakamoto H., Toya Y. Nondestructive assessments of residual stresses in railroad wheel rim by acoustoelasticity. *Journal of Engineering for Industry*, v.107, pp. 281 – 287, august 1985.
- Gallagher, M. T., Polzin, M. A., Wetenkamp, H. R. Aumento de carga em rodas de 36 polegadas – considerações mecânicas e térmicas, *Reunião Anual da Associação dos Oficiais do Departamento de Vagões dos Estados Unidos*, setembro 1992.
- Gordon, J., Jones, J. A., Perlman, A. B. Evaluation of service-induced residual stresses in railroad commuter car wheels. *Proceeding of International Mechanical Engineering Congress*, november, 1998.
- Gori, M., Certo, M., Patelli, G., Aruta, L. Ultrasonic assessment of residual stresses in the rim of railway solid wheels. *Proceedings of 7° ECNDT*, 5, 1998, Copenhagen.
- Hauk, V., Behnken, H., Genzei, Ch., Pfeiffer, W., Pintschovius, L., Reimers, W., Schneider, E., Scholtes, B., Theiner, W. A., *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods*. 1.ed. Reading: Schneider, E., 1997, Cap 4, Ultrasonic techniques, pp. 522 – 556.

Hughes, D. S. and Kelly, J. L., Second – Order Elastic Deformation of Solids, *Physical Review*, Vol. 92, No. 5, Dec 1953. Pp. 1145 – 1149.

James, M. R., Lu, J. *Handbook of Residual Stress Measurement*. 1.ed. Reading: Lu, J., 1996, pp. 1 –4, Fairmont Press, Lilburn, G.A.

Krautkramer, Germany. Ultrasonic transducers for non destructive testing; referências bibliográficas. Germany, 2003, 34p.

Kypa, J. M. R., Santos Júnior, A. A., Bray, D. E. Surface stress measurement using longitudinal critically refracted (Lcr) waves. *Proceedings of XV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 1999, Águas de Lindóia, Brasil.

Landa, M., Plesek, J. Ultrasonic techniques for non-destructive evaluation of internal stress. *Proceedings of 15° WCNDT*, 2000, Rome.

Link, W. *Metrologia mecânica*. São Paulo: Mitutoyo do Brasil, 1997, 174p.

Lonsdale, C., Demilly, F., Del Fabbro, V., Wheel rim residual stress measurement. *Proceedings of Railway Wheels Manufacturer's Engineering Committee*, 2000, Chicago.

Lubarda, V. A. New estimates of the third – order elastic constants for isotropic aggregates of cubic crystals. *Journal Mechanics Physical Solids*, v.45, No.4, pp. 471-490, 1997.

Orringer, O., Paxton, W. R., Gray, D. E., Raj, P. K. Residual stress and its consequences on both sides of the wheel-rail interface. *ElsevierWear*, 1996, v191, pp. 24-34.

Rodrigues, A. M., Silva Mineiro, E. S. *Quqlificação no Ensaio por Ultra – Som Nível I*. IFI / CTA / Subdivisão de Treinamento, 2000, 23p.

Rose, J. L., *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge University Press, 1999, Cap. 7,18 e 19, pp. 288-306.

Salamanca, L. T., Reinhart, E., Bray, D. E., Colis, M. J. Field applications of an ultrasonic method for stress measurement in structures. *Proceedings of 12th Non Destructive Testing World Conference*, 1989.

Sankar, B. N. Study of cold worked austenitic stainless steel – using LCR waves. *Proceeding of 15th WCNDT*, 2000, Rome.

Santos, F. C. Simulação das tensões de fabricação em rodas ferroviárias utilizando o método dos elementos finitos. *Laboratório Ferroviário – DPM – FEM – Relatório Interno*, 2003, UNICAMP.

Santos Júnior, A. A., Bray, D. E. Application of acoustoelastic techniques to railroad wheels stresses determination. *Proceedings of Cobem 99*, 1999, Águas de Lindóia

Santos Júnior, A. A., Bray, D. E., Kypa, J. M. R. Determination of Stresses in Plates Using Ultrasonic Shear Waves. *Proceedings of Cobem 99*, 1999, Águas de Lindóia.

Santos Júnior, A. A. *Relatório Final de Atividades de Programa de Pós-Doutoramento*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1999, 35p.

Santos Júnior, A. A., Bray, D. E. Ultrasonic stress measurement using PC based and commercial flaw detectors. *Review of Scientific Instruments*. V71, No9, September 2000.

Schneider E. (a) Nondestructive analysis of stress states in components using micromagnetic and ultrasonic techniques an overview. *Proceedings of 7th ECNDT*, 1998, Copenhagen.

Schneider E. Ultrasonic birefringence effect – its application for materials characterisations. *Elsevier Optics and Lasers in Engineering*, v22., 1995

Schneider E. (b) Ultrasonic evaluation of stress in the rims of railroad wheels. *Proceedings of 7th ECNDT*, 1998, Copenhagen.

Schneider E. (c) Youngs Modulus and Time-of-Flight Measurement. *NDTnet*, v3, No11, 1998.

Schramm, R. E. Ultrasonic measurement of stress in railroad wheels. *Review of Scientific Instruments*. November 1998, 23 p.

Schramm, R. E., Szelazek, J., Clark, A.V. Dynamometer-induced residual stress in railroad wheels: ultrasonic and saw cut measurements. *United Institute of Standards and Technology*, Report 30, March 1995, 37p.

Schramm, R. E., Szelazek, J., Clark, A.V. Residual stress in induction – heated railroad wheels: ultrasonic and saw cut measurements. *United Institute of Standards and Technology*, Report 28, May 1995, 54 p.

Stone, D. por E Mail em 17/7/2003, (dhstone@aculink.net)

Tanala, E. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods. *NDT&E International*, v28, No2, 1995, pp 83-88.

Temsamani, A. B., Vandenplas, S., Biesen, L. V. Surface waves investigation for ultrasonic materials characterization: theory and experimental verification. *Elsevier Ultrasonics*, v.40, pp. 73-76, 2002.

Walaszek, H., Abdallahoui Y., Lieurade, H. P. Potentialities of ultrasonics for evaluating residual stresses: influence of microstructure. *Proceeding of 15th WCNDT*, 2000, Rome.